

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **Удосконалення та дослідження електроприводу машини  
для різання полімерної плівки**

Виконав: студент 6 курсу, групи 601-МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

Бондар І.В.

Керівник Єрмілова Н.В.

Рецензент *Лактіонов О.І.*

Полтава - 2026 рік

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи магістра

### **«Удосконалення та дослідження електроприводу машини для різання полімерної плівки»**

Робота містить 83 сторінки, 33 рисунки, 7 таблиць, 20 використаних джерел літератури.

**Ключові слова:** полімерна плівка, бобінорізальна машина, електропривод, синтез регулятора, автоматичне керування.

Предметом дослідження є електропривод знімача бобінорізальної машини. Об'єктом дослідження є процес зміни навантаження при роботі електропривода бобінорізальної машини з врахуванням вимог до технологічного процесу різання, а також зменшення витрат енергетичних і технічних ресурсів.

Метою даної кваліфікаційної роботи є удосконалення та дослідження електроприводу машини для різання полімерної плівки для підвищення ефективності його роботи. В дослідженні проведений опис технології виготовлення пакувальної полімерної плівки та загальний аналіз обладнання для її виробництва та різання, визначені недоліки в його роботі в даний час. Здійснена модернізація приводу, визначені параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, розраховані його динамічні параметри, проаналізована робота двигуна в динамічних режимах.

Розроблена функціональна схема електроприводу з векторною системою керування, проведено математичне моделювання цього електроприводу, а також дослідження приводу на якість та стійкість. Дослідження довело працездатність модернізованого електроприводу. В роботі також проведений вибір приладів для автоматичного контролю та регулювання процесу виробництва пакувального матеріалу з полімерної плівки. Після більш детальної доробки модернізована машина може бути використана на виробництві пакувальної полімерної плівки.

## ABSTRACT

on master's qualification work

### **"Improvement and research of the electric drive of the polymer film cutting machine"**

The work contains 83 pages, 33 figures, 7 tables, 20 used literature sources.

**Key words:** polymer film, bobbin cutting machine, electric drive, regulator synthesis, automatic control.

The subject of the study is the electric drive of the spooler of the bobbin-cutting machine. The object of the study is the process of changing the load during the operation of the electric drive of the bobbin-cutting machine, taking into account the requirements for the technological process of cutting, as well as reducing the costs of energy and technical resources.

The purpose of this qualification work is to improve and research the electric drive of the polymer film cutting machine to increase the efficiency of its operation. The study describes the technology of manufacturing packaging polymer film and general analysis of the equipment for its production and cutting, identified shortcomings in its current operation. The drive was modernized, the parameters of the asynchronous motor replacement scheme were determined, its dynamic parameters were calculated, and the operation of the motor in dynamic modes was analyzed.

A functional scheme of an electric drive with a vector control system was developed, mathematical modeling of this electric drive was carried out, as well as a study of the drive for quality and stability. The study proved the functionality of the modernized electric drive. The work also includes a selection of devices for automatic control and regulation of the process of production of packaging material from polymer film. After more detailed finishing, the modernized machine can be used in the production of packaging polymer film.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»


Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки

Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Рівень вищої освіти Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри автоматичної,  
електроніки та телекомунікацій

 О.В. Шефер

“ 15 ” вересня 2025 р.

## **З А В Д А Н Н Я**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Бондару Іллі Віталійовичу**

1. Тема проекту (роботи) **«Удосконалення та дослідження електроприводу машини для різання полімерної плівки»**

керівник проекту (роботи) Єрмілова Наталія Василівна, к.т.н., доцент  
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.09.2025 р.  
№ 1025 - ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на бобінорізальну машину. Кількість пар ножів –  $n = 8$ ; товщина полімерного матеріалу –  $a = 3$  мм; маса  $1 \text{ м}^2$  полімерного матеріалу –  $m = 2,0$  кг. На базі дослідження динамічних режимів роботи бобінорізальної машини провести її модернізацію, дослідити якість системи автоматизації. Забезпечити перерегулювання у межах 20%, час регулювання не більше 0,5 с, величину помилки в усталеному режимі не більше 0,4%.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки Аналіз технологічного процесу та обладнання для виробництва і нарізання полімерної плівки. Бобінорізальна машина як об'єкт модернізації. Постановка завдань на магістерську роботу. Розрахунок і вибір типу електропривода та обладнання для модернізації. Розроблення функціональної схеми електропривода бобінорізальної машини. Синтез регуляторів системи керування електроприводом. Дослідження динамічних процесів в електроприводі модернізованої машини при зміні навантаження. Вибір приладів автоматичного контролю та регулювання. Висновки по роботі.

## 5. Перелік графічного матеріалу:

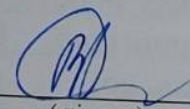
- 1) Актуальність теми, мета та задачі досліджень;
- 2) Технологічна схема виробництва пакувальних матеріалів ;
- 3) Основні структурні елементи бобінорізальної машини;
- 4) Конструкція знімача бобін;
- 5) Функціональна схема системи векторного керування АД;
- 6) Синтез регуляторів системи керування електроприводом;
- 7) Моделювання електромеханічної системи в MATLAB Simulink;
- 8) Дослідження модернізованої системи з векторним керуванням;
- 9) Визначення якісних характеристик електропривода;
- 10) Вибір обладнання для функціонування машини;
- 11) Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи		Примітка (плакати)
		Термін	Обсяг	
1	Аналіз технологічного процесу та обладнання для виробництва і нарізання полімерної плівки.	07.10.25	15%	Пл. 1
2	Бобінорізальна машина як об'єкт модернізації. Постановка завдань на магістерську роботу.	21.10.25	I 25%	Пл. 2
3	Розрахунок і вибір типу електропривода та обладнання для модернізації.	04.11.25	40%	Пл. 4
4	Розроблення функціональної схеми електропривода бобінорізальної машини.	11.11.25	50 %	Пл. 5
5	Синтез регуляторів системи керування електроприводом	18.11.25	II 60%	Пл. 6
6	Дослідження динамічних процесів в електроприводі модернізованої машини	25.11.25	70%	Пл. 7
7	Вибір приладів автоматичного контролю та регулювання.	09.12.25	80%	Пл. 8, 9
8	Оформлення магістерської роботи	22.12.25	III 100%	Пл. 11

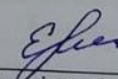
Магістрант

  
 (підпис)

Бондар І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
 (підпис)

Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1. Технологія виробництва полімерної плівки	9
1.2 Аналіз технологічного обладнання виробництва полімерної плівки	17
1.3 Аналіз роботи машин для флексографічного друку	17
1.4 Бобінорізальна машина як об'єкт модернізації	25
1.5 Обґрунтування сутності модернізації	27
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	
2.1 Розрахунок та вибір елементів електропривода	30
2.2 Розрахунок основних елементів силової схеми	42
2.3 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна	46
2.4 Розрахунок динамічних параметрів двигуна	52
2.5 Розроблення функціональної схеми електропривода машини	54
3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	
3.1 Синтез регуляторів системи керування електроприводом бобінорізальної машини	57
3.2 Моделювання базової електромеханічної системи з векторним керуванням	63
3.3 Дослідження електропривода бобінорізальної машини на стійкість	68
3.4 Визначення якісних характеристик електропривода	69
4 ВИБІР АПАРАТУРИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ	
4.1 Обґрунтування та вибір параметрів процесу, що підлягають контролю та регулюванню	71
4.2 Вибір приладів автоматичного контролю та регулювання	74
4.3 Розрахунок похибок вимірювальних контурів	79
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	82
ДОДАТКИ	84

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Сьогодні активно зростає попит на полімерні та композиційні матеріали з високими експлуатаційними властивостями. Всі заводи, електростанції, котельні, навчальні заклади, побутова техніка, яка оточує нас щодня, сучасні обчислювальні машини, автомобілі тощо використовують полімерні та композиційні матеріали.

Переробку полімерів та композиційних матеріалів можна розглядати як інженерну діяльність, пов'язану з перетворенням вихідних матеріалів в необхідні вироби. Більшість методів, що застосовуються в даний час в технології переробки цих матеріалів, є модифікованими аналогами методів, використовуваних в керамічній та металообробній промисловості.

Таким чином, тема магістерської роботи з метою інтенсифікації та підвищення енергоефективності процесу обробки полімерних матеріалів є досить актуальною.

**Предмет дослідження** – електропривод знімача бобінорізальної машини. **Об'єкт дослідження** – процес зміни навантаження при роботі електропривода бобінорізальної машини з врахуванням вимог до технологічного процесу різання, а також зменшення витрат енергетичних і технічних ресурсів.

**Метою магістерської роботи** є удосконалення та дослідження електроприводу машини для різання полімерної плівки для підвищення його енергетичної і технологічної ефективності.

Для реалізації даної мети потрібно виконати такі **завдання**:

- провести опис технології та обладнання виробництва, подати загальну характеристику виробництва і виробленої продукції;
- виконати опис технологічного процесу виробництва пакувальних полімерних плівок;

- виявити основні недоліки в роботі, розглянути конструктивні особливості обладнання для різання полімерної плівки;
- зробити розрахунок та модернізацію електропривода бобінорізальної машини;
- спроектувати сучасний електропривод знімача бобін та виконати дослідження його динамічних характеристик;
- вибрати прилади автоматичного контролю та регулювання.

**Методика проведення досліджень.** У роботі використана комплексна методика дослідження, що поєднує методи математичного моделювання та інструментальні засоби.

При побудові моделей використовувалися методи теорії електричних машин, теорії електроприводу та автоматичного керування, методи експериментально-теоретичного моделювання та комп'ютерної обробки інформації.

Розрахунки параметрів моделей, перехідних характеристик та моделювання системи автоматичного керування системою проводилися з використанням пакету прикладних програм MATLAB і його додатку Simulink.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Технологія виробництва полімерної плівки

У компанії ТОВ «І-ПАК» в даний час виготовляється наступна продукція:

– ламінований полімерним шаром папір, який характеризується низькою проникністю для жиру, пари та газів, а також високою хімічною стійкістю, що робить його придатним для пакування харчових продуктів із підвищеним вмістом жиру (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Структура ламінованого паперу

– папір квадрекс, триплекс призначені для побутової хімії, порційного фасування соусів та спецій (рис. 1.2);



Рисунок 1.2 – Структура паперу типу

а) папір квадрекс; б) папір триплекс

– матеріали з міжшаровою печаткою призначені для порційного фасування соусів, пельменів, морозива, макаронних виробів, побутової хімії, бакалії (рис. 1.3);

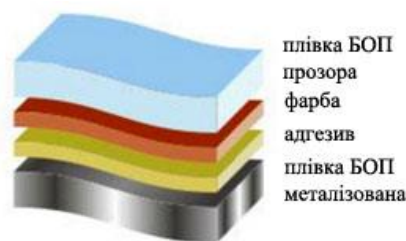


Рисунок 1.3 – Структура матеріалу з міжшаровою печаткою

- плівки з TWIST-ефектом відрізняються тим, що матеріал основного шару плівки орієнтований в одному напрямку та має високу залишкову деформацію, тобто здатністю зберігати скрутку при упаковці цукерок;
- пропілен прозорий підходить для етикетування продуктів в умовах, що вимагають захисту від впливу води, масел та хімікатів. Основне застосування: продукти та напої, парфумерія та косметика (рис. 1.4).

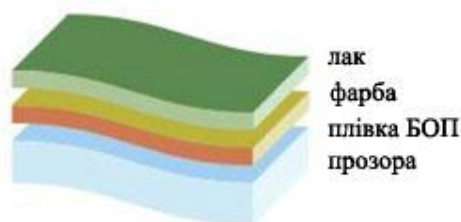


Рисунок 1.4 – Структура плівки з пропілену

- перловий пропілен за властивостями подібний до прозорого, однак завдяки спеціальній вспіненій мікроструктурі, яка відбиває світло та зменшує питому вагу, має додаткові переваги [1]. Він стійкий до дії низьких температур і не втрачає міцності при охолодженні. Саме тому цей матеріал широко використовується для пакування масла, жирів, глазурованих сирків, морозива, та інших харчових продуктів, що потребують зберігання у холодних умовах (рис. 1.5).

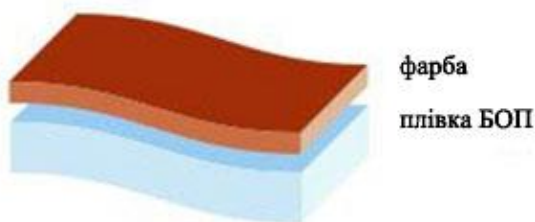


Рисунок 1.5 – Структура перлового пропілену

### **Підготовка матеріалів до друку.**

Плівка та фарба є основними матеріалами, що визначають найважливіші естетичні, а також експлуатаційні характеристики готової друкованої продукції. Саме тому технологічно обґрунтовані та регламентовані процеси підготовки вихідних матеріалів до друкування. Їх правильна підготовка до використання у виробництві необхідна для забезпечення ефективної, безперебійної роботи високопродуктивного друкарського устаткування.

Підготовка основних друкованих матеріалів полягає в забезпеченні повної відповідності їх один одному, а також призначенням і характером поліграфічного оформлення продукції, типу застосовуваного друкарського обладнання та кліматичних умов навколишнього середовища. Процеси підготовки плівки (і фарби) до друку в умовах друкарні можуть бути представлені трьома основними етапами: контроль всіх матеріалів на вході; додруковане коригування друковано-технічних властивостей матеріалів (в основному фарби) відповідно до конкретних особливостей їх застосування; контроль та оперативне регулювання друковано-технічних якостей в процесі друкування тиражу, що в першу чергу стосується фарби.

При підготовці матеріалів до використання у виробничому процесі враховуються умови їх транспортування та зберігання. При вхідному контролі матеріалів проводиться перевірка таких параметрів, як розміри, маса матеріалів, що поступають, стан пакування матеріалів, також вимірюється вологість паперу.

### **Підготовка плівки до друку.**

Процес підготовки плівки є обов'язковим етапом для всіх основних методів друку, а специфіка його виконання залежить насамперед від типу друкарської машини — чи використовує вона листову, чи рулонну плівку.

На цьому етапі лабораторія підприємства контролює вологість плівки, щоб визначити її відповідність нормативним показникам і зіставити отримані

дані з рівноважною вологістю паперу за фактичних кліматичних умов друкарського цеху.

Додатково може проводитися аналіз таких характеристик, як волокнистий склад, маса, щільність, товщина, зольність та анізотропія (відмінність властивостей листа в машинному та поперечному напрямках), неоднорідність лицьової та оберненої сторін тощо.

До контрольованих параметрів належать також показники міцності, зокрема механічні властивості: розривна міцність, стійкість до надриву, роздирання, продавлювання й зламу, а також пружність, стисливість, когезійна та фізико-хімічна стійкість верхнього шару плівки [2].

Крім того, періодичному чи постійному контролю підлягають властивості плівки, що виявляються переважно під час її безпосереднього контакту з друкарською фарбою на різних етапах отримання відбитка: рівень гладкості, ступінь проклеювання, здатність до вбирання, стійкість до дії зволожувального розчину, прозорість та світлопроникність матеріалу.

Підготовка рулонної плівки, крім наведених вище лабораторних досліджень, також полягає у звільненні рулонів від упаковки, зовнішньому огляді їх та видаленні зіпсованих шарів (зриву), наявність яких буде свідчити про порушення, що супроводжують процеси перевезення, внутрішньозаводського транспортування та зберігання рулонів.

До числа серйозних дефектів рулонів відноситься нециліндричність форми, яка, поряд з неправильними транспортуванням та зберіганням, викликається як нерівномірністю намотування полотна, так і відхиленнями в його товщині від норми. Це може призводити до доволі великих змін зусилля натягу плівки при проходженні її через машину, що друкує.

Для нормальної роботи машини вологість та температура плівки повинні приводитися в рівноважний стан з вологістю та температурою у друкарському цеху. Це має назву акліматизації вихідних матеріалів. За відсутності такої рівноваги можуть змінюватися розміри плівки, порушуватися площинність листа плівки (викривлення країв, хвилястість), а

також може виникнути ряд інших дефектів та ускладнень, що викликають появу браку в процесі друкування тиражу.

Можна виділити наступні цілі акліматизації вихідного матеріалу [3]:

1. При акліматизації усуваються внутрішні напруження, котрі можуть виникати в плівці при її виготовленні або транспортуванні. Саме наявність внутрішніх напружень, певного запасу енергії є потенційним джерелом деформаційних змін плівки і небажаних технологічних ускладнень, перш за все – при багатоколірному друкуванні можуть не суміщатися різні фарби.

2. Також акліматизація забезпечує розмірну та деформаційну стабільність паперу при друкуванні, при цьому виключається отримання або втрата паперовим шаром деякої кількості вологи, які можуть викликати погіршення його друковано-технічних властивостей.

3. Зменшення ймовірності виникнення на поверхні полімеру зарядів статичної електрики, що роблять практично неможливим нормальний друкований процес без застосування нейтралізуючих пристроїв.

Згідно з чинними технологічними інструкціями, акліматизацію плівки обов'язково здійснюють у випадках, коли різниця між відносною вологістю паперу в стопі та повітрям у цеху перевищує величину  $\pm 10\%$ , або ж коли коливання вологості повітря всередині рулону становить понад  $\pm 5\%$ . За значних перепадів вологості рулонну плівку витримують у приміщенні друкарського цеху протягом певного періоду — від кількох годин до кількох діб.

### **Підготовка фарби.**

Основним завданням підготовки фарб для будь-якого способу друку є забезпечення їх потрібними колористичними та друкарсько-технічними властивостями з урахуванням типу, специфіки, призначення та терміну експлуатації даної друкованої продукції, особливостями застосовуваної плівки та обладнання, на якому проводиться друкування [4].

Перелік контрольованих параметрів, способи підготовки та допоміжні засоби та матеріали, що використовуються при підготовці фарби для різних

способів друкування, неоднакові, що обумовлено структурно-реологічними особливостями самих фарб.

На рисунку 1.6 представлена технологічна схема виробництва пакувальних матеріалів.

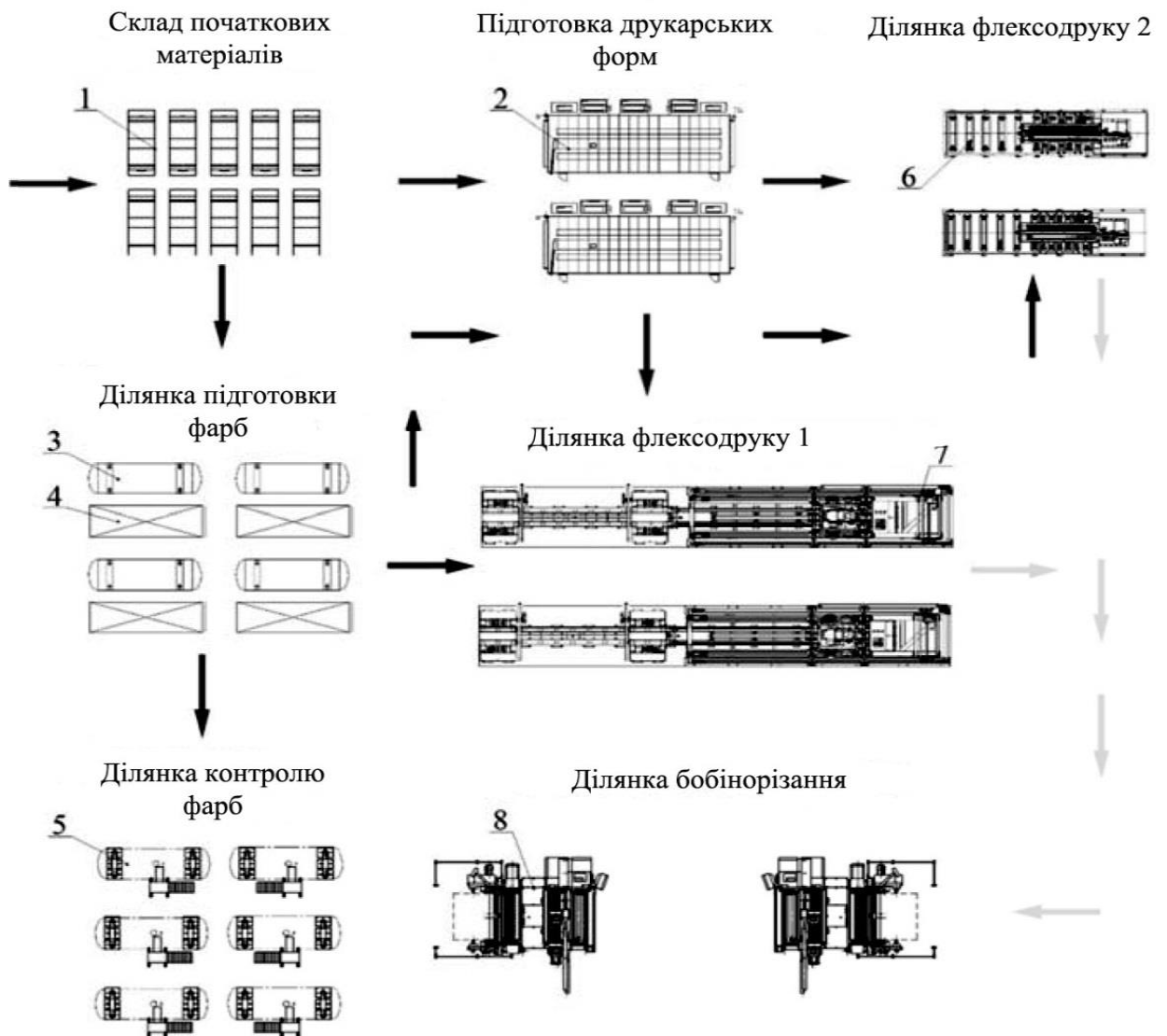


Рисунок 1.6 – Технологічна схема виробництва пакувальних матеріалів

1 – кліматична камера; 2 – верстат підготовки друкованих форм; 3 – камера змішувача; 4 – утилізатор; 5 – витяжний бокс; 6 – флексодрукарська машина FEVA; 7 – флексодрукарська машина MarkAndy P4;

8 – бобінорізальна машина Venus III

До особливостей підготовки вузьких фарб високого та офсетного друку можна віднести:

– вибір фарби, яка максимально точно буде відповідати колористичним параметрам відтворюваного оригіналу за кольором та його відтінком (у разі відсутності потрібних фарб у друкарні – шляхом їх приготування з використанням лабораторного обладнання для змішування та розтирання фарб);

– перевірка найважливіших друковано-технічних властивостей відібраних зі стандартного асортименту або підготовлених в колористичному відділенні комплектів фарб: оцінка властивостей фарби в масі (ступінь перетирання, в'язкість (плинність), липкість, схильність до запилення, ймовірність затвердіння на валиках друкованої машини, тиксотропія, барвна сила);

– оцінка властивостей фарби, які проявляються нею при взаємодії з друкарською формою і запечатуванням матеріалом (визначення коефіцієнта фарбопереносу, особливостей сприйняття фарби друкарською формою та запечатуванням матеріалом, вищипування використовуваної фарбою тиражного друкарського паперу, швидкості закріплення фарби на відбитку, ймовірності виникнення відшарування фарби та пробивання паперу, оптичної щільності, колірного тону, насиченості та яскравості (світлин), прозорості фарб відбраного комплекту, глянцеvitості та світлостійкості відбитка, а також його чіткості й рівномірності);

– перевірка міцності барвистого шару відбитка – тобто міцності до стирання, стійкості до води та різних хімічних впливів, а також до лакування; коригування друковано-технічних властивостей фарб з урахуванням результатів випробувань шляхом застосування допоміжних засобів різного призначення: сикативів, спеціальних паст, малов'язких сполучних або окремих їх компонентів в якості розріджувачів, а також добавок, що запобігають запилюванню.

Властивостями фарб високого та офсетного друку, що найбільш часто вимагають коректування в процесі друкування тиражу, є липкість і в'язкість. Зміна цих властивостей в часі може бути обумовлено не тільки

особливостями взаємодії фарби та форми друку, скільки впливом зовнішніх чинників, зокрема режимних параметрів друкованого процесу (перш за все швидкості та технологічно необхідної товщини шару фарби на відбитку), а також умов закріплення фарби на відбитку безпосередньо в друкарській машині.

Зміна липкості фарби після випаровування розчинника може призводити до розриву паперового та плівкового полотна при раптовій зупинці друкарської машини та її запуску, прилипання плівки до передавального циліндра, непередбачуваної зміни натягу полотна, також збільшеного ризику його обриву, та до ускладнень, пов'язаних з обробкою запечатаного паперового полотна в фальцевально-ріжучому пристрої.

Підготовка мало-в'язких фарб глибокого та флексографічного друку в цілому повторює виконання всіх перерахованих вище операцій, тобто їх підбору, перевірки та коригування друковано-технічних властивостей, але має деякі відмінності [4].

Перелік досліджуваних друковано-технічних властивостей та параметрів мало-в'язких фарб дещо обмежений в порівнянні з в'язкими фарбами. Це викликано особливостями складу та структурно-механічних властивостей самих фарб та з повною відсутністю серійно виготовляючих прободрукарських пристроїв для нестандартних видів друкування.

Лабораторному контролю обов'язково підлягають такі показники малов'язких фарб: щільність, вміст та кількість забруднювальних домішок, ступінь перетирання, умовна в'язкість фарб та їх схильність до седиментації. Також перевіряють вплив розчинників для флексографських фарб на фотополімерні й гумові друкарські форми, зносостійкість фарб глибокого друку щодо абразивного стирання металевих формних циліндрів і швидкість закріплення фарби на відбитку, міцність зчеплення сухого залишку фарби з підкладкою; схильність відбитків до злипання (особливо при друкуванні на високощільних, слабо всмоктуючих фарбу матеріалах); градаційні й кольорові показники відбитків та їх глянцеovitість [4]. Об'єктами

вимірювання у всіх випадках є пробні відбитки, що виготовляються перед початком друкування тиражу на пробо-друкарських машинах.

## 1.2. Аналіз технологічного обладнання виробництва полімерної плівки

У таблиці 1.1 представлена коротка технічна характеристика технологічного обладнання, що використовується для виробництва пакувального матеріалу на ТОВ «І-ПАК».

Таблиця 1.1 – Характеристика технологічного обладнання

№ з/п	Найменування обладнання	Кількість, од.	Технічна характеристика обладнання
1	Кліматична камера	10	Корисний об'єм 0,5 м <sup>3</sup> Потужність 1,5 кВт
2	Верстат підготовки друкованих форм	2	Тип – лінійний; Потужність 2,0 кВт
3	Змішувальна камера	4	Корисний об'єм 0,2 м <sup>3</sup> Потужність 1,5 кВт
4	Утилізатор	4	Корисний об'єм 0,5 м <sup>3</sup> Потужність 3,0 кВт
5	Витяжний бокс	6	Тип – вертикальний; Потужність – 0,5 кВт
6	Флексодрукарська машина FEVA	2	–
7	Флексодрукарська машина MarkAndy P4	2	–
8	Бобінорізальна машина Venus III	2	–

## 1.3. Аналіз роботи машин для флексографічного друку

Всі машини для флексографічного друку можна розділити на дві основні групи з підгрупами.

1) Багатоциліндрові друкарські машини:

- друкований апарат-приставка в установці для обробки;
- друкарські машини компактної побудови;

– друкарські машини секційної побудови,

2) Друковані машини з центральним циліндром.

З обох груп можна побудувати потокову лінію або комбінацію друкованих машин різних способів друку.

Різні типи машин використовуються для друку різних пакувальних матеріалів (від найтонших штучних матеріалів до товстого картону) та для друку шпалер, етикеток, книг, шкільних зошитів та іншої спеціальної продукції. Надзвичайно важливим є вибір правильної машини для певної сфери застосування, щоб досягти оптимального рішення.

### **Друкарська секція-приставка**

Попередниками сьогоднішніх друкованих секцій-приставок, що з'явилися на межі століть були анілінові барвисті апарати. Вони встановлювалися на машинах для виготовлення паперових пакетів та служили для друку паперових пакетів та сумок однією або двома фарбами або «механічному штампуванню» (рис.1.7). Згодом цей досвід було перенесено на друкування листів та мішків.

В середині нашого століття повсюдно виникли тисячі комбінацій машин, що складаються з секції для обробки паперу та інших носіїв апаратів-приставок для виробництва та друкування паперових пакетів, мішків, листів, рулонів. Цей раціональний режим роботи після розробки поліетилену був перенесений на високий друк.

Друкарська секція-приставка підходить не для всіх друкованих мотивів, тому дуже важливо знати технічні можливості та межі. Звичайні мотиви для цих апаратів складаються з векторних об'єктів, поверхонь та текстів. Було б невірно та нерентабельно використовувати такі друкуючі апарати для багатобарвного друку послідовним накладенням фарб по всій поверхні або для тонких штрихів та растрової печаті. Для цього потрібні додаткові пристрої, які є на машині для флексографічного друку з рулону на рулон та які можуть економічно використовуватися тільки тут. Крім того,

обслуговуючий персонал оздоблювальних машин, як правило, не має необхідних спеціальних знань по флексографічному друку.

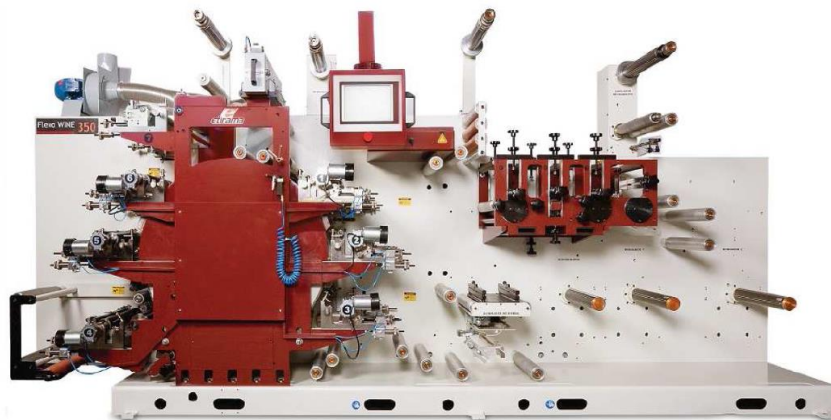


Рисунок 1.7 – Чотирифарбова друкарська секція-приставка в машині для виробництва пакетів

### **Компактна багатоциліндрова друкарська машина**

Перша машина для флексографічного друку з рулону на рулон була багатоциліндрова та була створена на основі відомої друкованої секції-приставки. Як правило, багатоциліндрова друкована машина має від 4 до 8 друкованих апаратів, причому з кожної сторони станини друкованої секції розміщені від двох до чотирьох фарб. Компактна побудова такої машини у всіх виробниках машин приблизно однакова.

Полотно матеріалу подається зі звичайною розмоткою або з розмотування зі зміною рулону через пристрій для створення петлі до станини друкованого апарату. Тут відбувається багатобарвний друк, причому після кожного апарату проводиться сушка поверхні друкованої фарби. Після останнього друкованого апарату полотно матеріалу проводиться через сушильний канал або інші установки для додаткової сушки, де нанесена фарба повинна остаточно висохнути, через охолоджуючий циліндр з пристроєм для створення петлі до намотувальних пристроїв. Багатоциліндрова машина використовується для друку найрізноманітніших, але жорстких матеріалів. Точність поздовжньої проводки такої машини становить сьогодні  $\pm 0,2$  мм.

Для гнучких матеріалів та більш високої точності приведення повинні використовуватися машини з центральним циліндром (рис.1.8). На багатоциліндрових друкованих машинах, як правило, запечатується папір зі швидкістю 600 м/хв. Робоча ширина становить від 600 до 2500 мм. Цей тип машин, який користувався підвищеним попитом майже 30 років тому, в останні роки все більше відтісняється машинами з центральним циліндром.



Рисунок 1.8 – Чотирифарбова багатоциліндрова друкарська машина з рулону на рулон для двофарбового друкування з лиця та з обороту, з пристроєм для згинання сторінок

Багатоциліндрова друкарська машина складається, як правило, з підстави, або станини з сірого чавуну або сталі, на які встановлюються друковані апарати з одного або з двох сторін.

Є конструкції, при яких з однієї сторони один на інший встановлюються до 5 друкованих апаратів, і такі, при яких з двох сторін один на інший встановлюються від 3 до 5 друкованих апаратів. Таким чином, друкарська машина може бути оснащена від 1 до 10 друкованими апаратами. Але це, як правило, не роблять для того, щоб зробити восьмифарбові відбитки, а друкують на кількох друкованих апаратах, щоб підготувати інші апарати до наступного замовлення.

Основа повинна бути стабільною, так як вона служить опорою для друкованих циліндрів, через які проводиться полотно матеріалу та які обертаються паралельно один одному. Крім того, на основі встановлені

коробки передач, провідні шестерні для приведення в дію окремих друкованих циліндрів та друкованих апаратів, а також пристрої для створення петлі. Кронштейни для установки барвистих апаратів розташовані або на основі, або на торцевій або передній стороні, тут потрібна стабільність конструкції та точність.

Конструкція окремих друкованих апаратів може бути різною. Наприклад, використовуються друковані апарати з трьома валиками: передаточним валиком, валиком з розтрированою поверхнею та формним циліндром.

У ротаційних друкарських машинах здебільшого знаходять застосування друковані апарати з двома валиками: валиком з розтриваною поверхнею з ракелем та формним циліндром.

Майже всі машини мають змінний формат, тому можна досягати різної довжини відбитків. Для цього необхідно замінити формовий циліндр. Слід використовувати формовий циліндр з окружністю, що буде відповідати довжині відбитка. Діапазони довжин відбитків окремих машин різні. На малих машинах вони складають від 250 до 800 мм, на більш широких – від 350 до 1000 або навіть 1600 мм, але є конструкції для діапазону довжини відбитка від 500 до 2600 мм і більше.

### **Багатоциліндрова друкована машина з центральним колесом**

З деякого часу на ринку пропонуються багатоциліндрові друкарські машини з особливою приводною системою. Мова йде про ярусну систему, при якій 6 або 4 друкованих апаратів машини наводяться в рух одним центральним колесом.

На такій машині за допомогою центрального колеса досягається гарний синхронний хід друкованих апаратів. Оскільки полотно матеріалу вільно проходить між окремими фарбованими апаратами, цей тип машин використовується тільки для жорстких матеріалів. Допуск по продольній провідці становить  $\pm 0,1$  мм. Друк зворотного боку неможливий окремими друкованими апаратами.

## **Багатоциліндрова друкарська машина секційної побудови**

Ця машина побудована як машина глибокого друкування. На кожному друкованому апараті можна друкувати тільки одну фарбу, але можна встановити один за одним будь-яку кількість друкованих апаратів, причому привід здійснюється через карданний вал або привідні пристрої з електричним валом. Для цієї машини потрібно багато місця та потрібні великі капіталовкладення. Перевагою є довгий шлях сушки між окремими друкованими апаратами – тобто тут можна друкувати на великій швидкості.

Для такої машини потрібні реєстровий валик між окремими друкованими апаратами, щоб виправляти порушення поздовжнього приведення, а також електронний пристрій контролю поздовжнього приведення та регулюючий пристрій. Звичайно, на такій машині за допомогою установки пристрою поворотної штанги або іншої проводки полотна можна друкувати на лицьовому та зворотньому боці полотна матеріалу будь-якою кількістю фарб. При великій ширині друкування на машинах секційної побудови обробляється картон та папір зі швидкістю до 600 м/хв.

### **Машина з центральним циліндром**

Перша машина з центральним циліндром, що також називається планетарною машиною, на якій барвисті апарати розташовуються навколо великого друкованого циліндра за планетарною схемою, була розроблена та представлена в 1953-1954 роках (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Сучасна восьмифарбова машина з центральним циліндром

Імпульс для створення цієї машини дала галузь виробництва плівки зі штучних матеріалів, адже для друку гнучких матеріалів були потрібні машини з точною проводкою полотна матеріалу під час процесу друкування. Таким чином, це ротаційна друкарська машина з високою точністю приведення без додаткової механічної або електронної підтримки та додаткових пристроїв [5].

### Бобінорізальні машини

Бобінорізальні машини призначені для поздовжнього розрізання рулону тканини, паперу, марлі, полімерної плівки, ламінованих та інших матеріалів дисковими ножами на стрічки та їх намотування в рулони меншою ширини, які називаються бобінами. Бобіни використовуються при роботі блокооброблюючих машин для виробництва кришок та інших машин.

Все бобінорізальні машини будуються приблизно за однаковим принципом (рис.1.10).

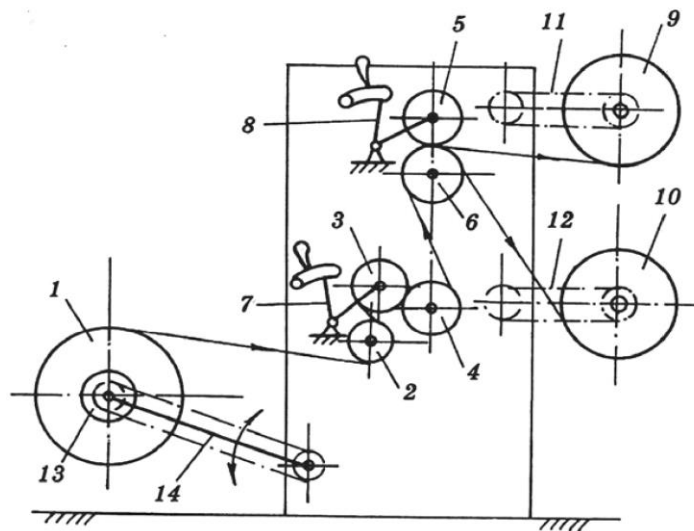


Рисунок 1.10 – Кінематична схема бобінорізальної машини

Рулон матеріалу 1 затискається двома конусами 13, встановленими в двох важелях 14, з'єднаних між собою валом. Спеціальний підйомний механізм опускає важелі 14 вниз для установки рулону та піднімає разом з рулоном в робоче положення. На кронштейнах позаду машини встановлені

вали, на які намотуються бобіни розрізаного матеріалу 9 та 10. Розрізку виконують дискові ножі 5 та 6. Кількість пар ножів на валах визначається шириною потрібної продукції.

Полотно матеріалу проводиться через машину наступним чином. З рулону 1 полотно огинає вирівнюючий валик 2, далі проходить між тягнучими валиками 3 та 4, перший з яких прогумований, його притиск регулюється за допомогою рукоятки 7 з подальшою фіксацією. Далі відбувається розрізання полотна дисковими ножами 5 та 6, при цьому величина перекриття крайок ножів встановлюється за допомогою рукоятки 8. Розрізані стрічки матеріалу намотуються в бобіни 9 та 10.

Намотувальні вали бобін 9 та 10 мають ланцюгові приводи 11 та 12 через фрикційні муфти, призначені для створення постійного натягу стрічок розрізаного матеріалу та забезпечення щільного намотування бобін. Для безперешкодного намотування бобіни зазвичай розташовуються на намотувальних валах в шаховому порядку.

Для реалізації якісного різання ножі одного з валів притискаються до дискових ножів другого валу пружинами. Для відводу верхніх ножів служить важіль 8. Ножі можуть переміщатися уздовж валу по поздовжній шпонці та фіксуватися в певних місцях за необхідності зміни ширини бобін.

Бобінорізальні машини випускають багато виробників з рядом додаткових пристроїв. Багато сучасних машин мають автоматичну систему бокового рівняння та контролю за натягом полотна. Поздовжня різка здійснюється дисковими (щільні матеріали) або плоскими (плівкові матеріали) ножами.

Щільність намотування бобін забезпечується регулюванням зчеплення дисків фрикційних муфт або фрикційних в приводі шпинделів намотування. Вирівнювання краю полотна здійснюється системою бічного рівняння шляхом переміщення корпусу розмотування 3 відносно корпусу намотування.

#### 1.4. Бобінорізальна машина як об'єкт модернізації

Компанія ТОВ «І-ПАК» здійснює випуск високоякісної гнучкої упаковки, однією зі стадій виробництва якої є заготівельно-розкрійне виробництво, що здійснюється на бобінорізальній машині (рис. 1.11).

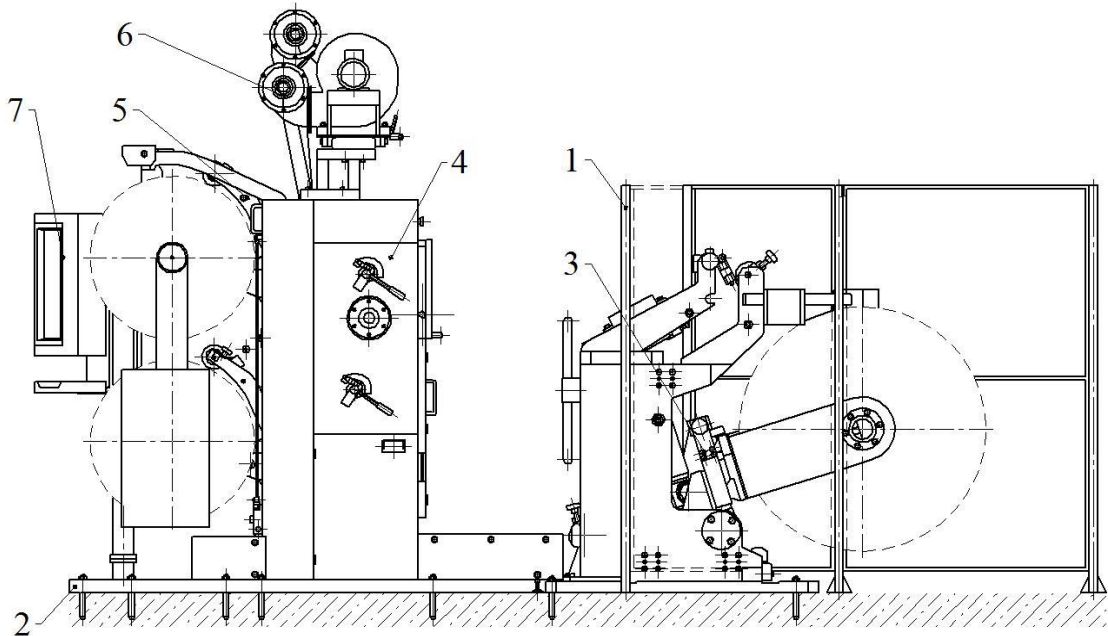


Рисунок 1.11 – Загальний вигляд бобінорізальної машини

1 – рама; 2 – станина; 3 – вузол розмотування; 4 – вузол різання і транспортування; 5 – вузол намотування; 6 – місцева вентиляція;  
7 – пульт керування

Устаткування призначене для поздовжнього різання та перемотування полімерної плівки, алюмінієвої фольги, паперу та ламінату. Машина складається з окремого модуля різання-намотування 6 та окремого модуля розмотування 3. Пристрій різання і транспортування матеріалу створює мостовий перехід між цими двома модулями. Розглянемо основні вузли машини.

Вузол розмотування:

- автоматичне регулювання натягу розмотуваної смуги за допомогою пневматичного керованого циліндра балерини та електричного моторного гальма;
- доступні обидва напрямки обертання рулону;

- автоматичне бокове рівняння по краю матеріалу;
- безвалова фіксація розмотуючого рулону для полегшення маніпуляції з розмотуючого рулону;
- гідравлічні опускаючі плечі, що дозволяють спростити завантаження рулону безпосередньо з підлоги.

#### Вузол різання і транспортування:

- ведений розгінний циліндр з можливістю кутової регуляції, проста заміна ріжучого інструменту проходить безпосередньо в машині;
- можливість оснащення системою «Асистент позиціонування ножів / лез» для швидкого налаштування ріжучого інструменту при зміні замовлення
- провідний циліндр з гумовим покриттям з притискними накатними роликками перед ножовою секцією;
- провідні циліндри з алюмінієвого сплаву, які обклеєні стрічкою з адгезійною поверхнею або фальцьовані, твердо анодовані;
- регульований провідний циліндр для оптимального доторку смуги матеріалу до нижнього ножового валу при різанні по дотичній;
- адаптер для різання лезами в спеціальних власниках (включаючи механізм автоматичного гойдання лез).

#### Вузол намотування:

- відкидні опори валів намотування з пневматичним керуванням дозволяють легко знімати намотані рулони;
- пневматичні розширюючі вали намотування оснащені спеціальними фрикційними кільцями;
- автоматичне регулювання налаштованого намотуючого тягового зусилля;
- система «Тензомат» для точного регулювання намотуючого тягового зусилля за допомогою тензометрів;
- автоматичні кріпильні планки перед валами намотування для кріплення відрізаних смуг матеріалу.

Така будова має наступні переваги:

- простий перехід до використання гільз різного діаметру два вала намотування, накладених одна на одну;
- можливість застосування окремо підресорених притискних циліндрів різної ширини;
- можливість оснащення системою для машинного відрізання намотаних рулонів можливість установки системи намотування з мінімальним зазором між рулонами та притискними циліндрами;
- можливість застосування опціонального моментного способу намотування (альтернатив до фрикційному);
- можливість установки пристрою для машинного переміщення намотаних рулонів на стрижні розвантажувального стенду;
- можливість додаткової установки автоматичною лазерною указкою для швидкої та точної установки гільз у розвантажувальний стенд в двох варіантах лазер-сканер для захисту простору намотування.

### **1.5. Обґрунтування сутності модернізації**

ТОВ «І-ПАК» випускає високоякісну гнучку упаковку, одною зі стадій виробництва якої є заготівельно-розкрійне виробництво, що здійснюється на бобінорізальній машині. Однією з економічних складових будь-якого виробництва є нарощування обсягів та зниження собівартості продукції.

Нині процес розкрою полімерних матеріалів на досліджуваній бобінорізальній машині має низку недоліків:

- доволі великі витрати часу на вилучення готових бобін із машини та їх подальше транспортування на стелажі;
- розмотування вихідної бобіни виконується приводом вузла намотування, що у випадку аварійної зупинки обладнання спричиняє зайве розмотування матеріалу.

Після завершення операції різання бобіни полімерного матеріалу на задану кількість вторинних бобін машина зупиняється, а до валів намотування приєднується механізм знімання готової продукції – знімач

бобін (рис. 1.12). Оператор вручну перетягує бобіни на механізм знімання. Після чого знімач бобін повертається та оператор теж вручну вивантажує бобіни на стелажі. В роботі нам треба усунути ці ручні операції.

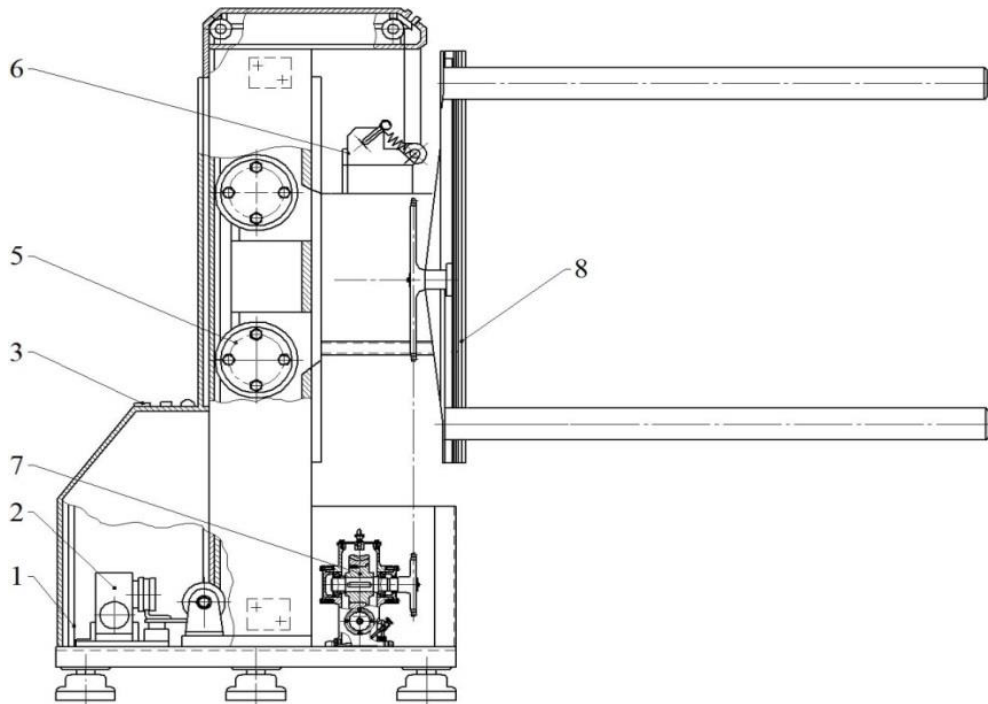


Рисунок 1.12 – Знімач бобін

1 – рама; 2 – привід ланцюгової передачі; 3 – корпус; 4 – колона;  
5 – ролики напрямні; 6 – запобіжний механізм; 7 – привід механізму  
знімання; 8 – механізм знімання бобін

На рисунку 1.13 представлена конструкція запропонованого нового вузла розмотування матеріалу.

Вузлом розмотування є механізм, що складається з втулок 1, 2 для фіксації бобіни з полімерним матеріалом, безпосередньо приводного механізму 4. У разі екстреної (аварійної) зупинки машини, для виключення подальшого розмотування матеріалу в бобіні передбачається встановити гальма 5, 6.

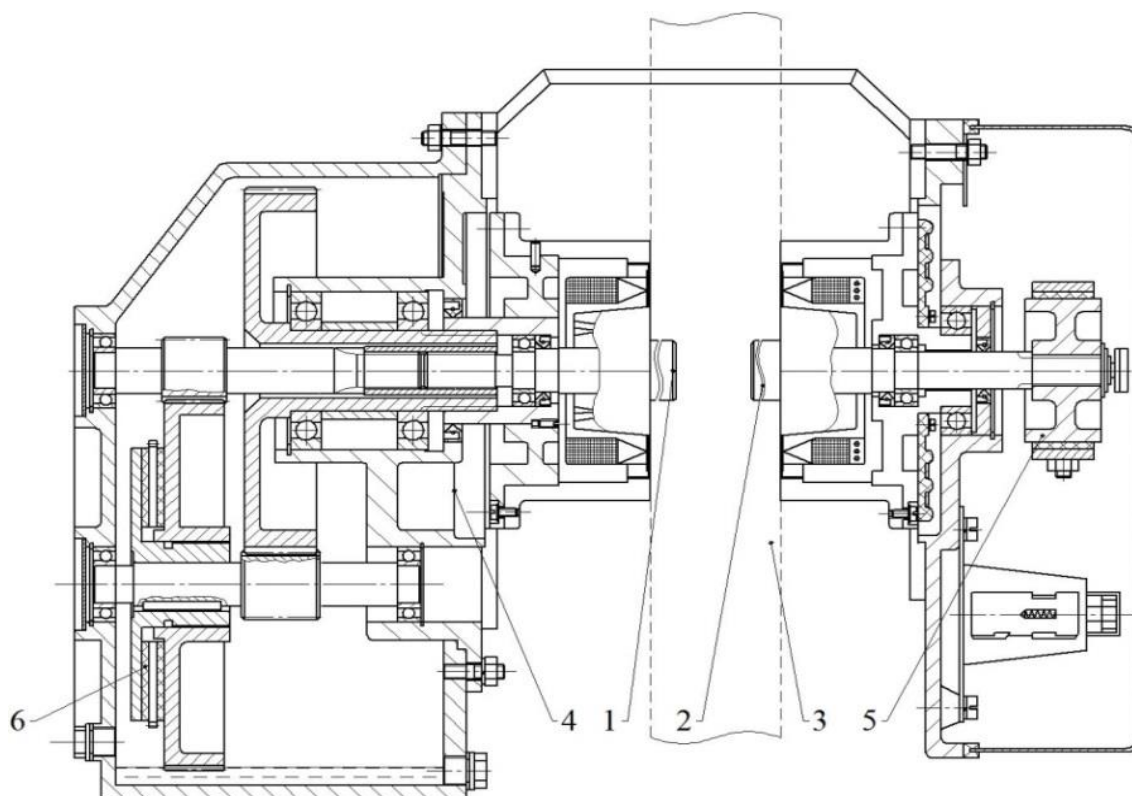


Рисунок 1.13 – Вузол розмотування

1 – втулка ліва; 2 – втулка права; 3 – бобіна; 4 – привідний механізм; 5 – гальмо дискове; 6 – гальмо колодкове

### Висновки до розділу

В розділі розглянуті конструктивні особливості обладнання для різання полімерної плівки, проведено дослідження об'єкта проектування, де описані основні недоліки в роботі в даний час. Розглянуті заходи по його удосконаленню, які дозволять суттєво зменшити час простоїв усього обладнання при виконанні ряду ручних допоміжних операцій, що повинно призвести до значного збільшення технологічної продуктивності. В роботі необхідно спроектувати сучасний електропривод автоматичного знімача бобін та виконати дослідження його динамічних характеристик.

## 2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1. Розрахунок та вибір елементів електропривода

#### 2.1.1. Розрахунок зусиль при різанні полімерного матеріалу

При роботі заготівельно-розкрійного устаткування виникають технологічні навантаження від розрізання матеріалів: картону, паперу, палітурних тканин тощо. Для поперечного різання використовують різальні пристрої підйомник (ніж – контрніж), для поздовжнього – принцип ротаційного різання дисковими ножами. Нижче наведено методику визначення технологічних зусиль, які виникають при роботі цих інструментів.

Вихідні дані для розрахунку:

- кількість пар ножів –  $n = 8$ ;
- товщина полімерного матеріалу –  $a = 3$  мм;
- величина перекриття ножів –  $s = 1,5$  мм;
- маса  $1 \text{ м}^2$  полімерного матеріалу –  $m = 2,0$  кг;
- радіус ножів –  $R = 85$  мм.

Визначимо показник маси за такою формулою:

$$\rho = \frac{m}{a}, \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{2,4}{3} = 0,8 \text{ кг/мм.}$$

З джерела [7] відомо, що для отриманої щільності опір зрізу  $\tau_{\text{сер}} = 12 \text{ Н/мм}^2$  та відносна глибина надрізки  $\varepsilon = 0,62$ .

Визначимо величину  $\text{tg } \alpha$  за такою формулою:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{\sqrt{R \cdot (s + a) - \left(\frac{s + a}{2}\right)^2}}{R - \frac{s + a}{2}}, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\sqrt{R \cdot (s + a) - \left(\frac{s + a}{2}\right)^2}}{R - \frac{s + a}{2}}.$$

Визначимо зусилля різання за формулою:

$$F = 1,7 \cdot n \cdot a^2 \cdot \tau_{\text{cp}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}, \quad (2.3)$$

$$F = 1,7 \cdot 8 \cdot 3^2 \cdot 12 \cdot 0,62 \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,234} = 1946 \text{ Н.}$$

### 2.1.2. Розрахунок приводу знімача бобін

Для розрахунку приводу знімача бобін визначимо потужність, затрачену на поворот механізму знімання бобін. Схема навантаження представлена на рисунку 2.1.

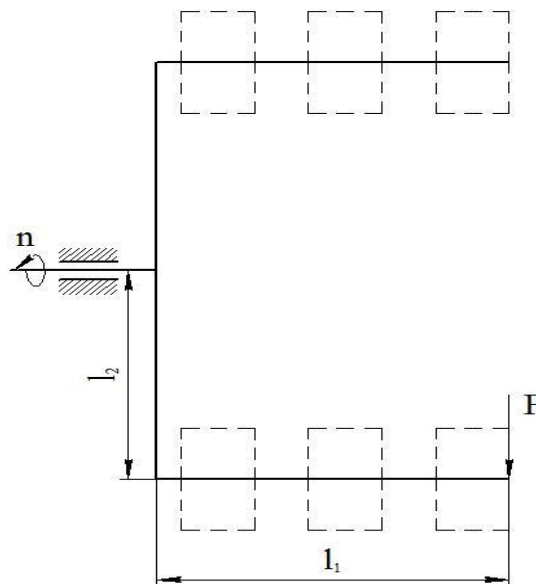


Рисунок 2.1 – Схема навантаження механізму знімання бобін

Для розрахунку прийемо, що верхня вісь не навантажена. Отже необхідно подолати зусилля підйому. Таким чином крутний момент визначимо за формулою:

$$T_{\text{вих}} = F \cdot l_2, \quad (2.4)$$

де:  $F$  – зусилля на вісь валка, Н;

$l_2$  – відстань від прикладання навантаження до вісі обертання, м.

Силу, діючу на механізм знімання, визначимо за формулою:

$$F = F_1 + F_2, \quad (2.5)$$

де:  $F_1$  – сила від ваги вісі механізму знімання, Н;

$F_2$  – сила від маси бобін полімерного матеріалу, Н.

Тоді отримаємо:

$$F = 395,2 + 2000 = 2395,2 \text{ Н.}$$

$$T_{\text{вих.}} = 2395,2 \cdot 0,45 = 1077,84 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Визначимо потужність, необхідну для повороту механізму знімання за такою формулою:

$$P_{\text{вих}} = \frac{n \cdot T_{\text{вих.}}}{9549}, \quad (2.6)$$

де:  $n$  – частота обертання механізму знімання,  $\text{хв}^{-1}$ .

$$P_{\text{вих}} = \frac{15 \cdot 1077,84}{9549} = 1,69 \text{ кВт.}$$

З урахуванням конструкції механізму знімання бобін приймемо наступну схему вузла повороту, представлену на рисунку 2.2.

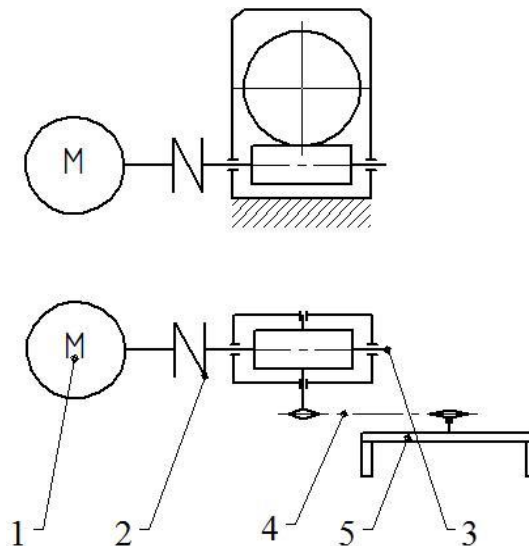


Рисунок 2.2 – Кінематична схема механізму знімання бобін

1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – черв'ячний редуктор; 4 – ланцюгова передача; 5 – механізм знімання бобін

Необхідну потужність електродвигуна  $P_1$  знаходимо з урахуванням втрат, що виникають в приводі:

$$P_{\text{дв}}^{\text{розр}} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta_{\text{заг}}}, \quad (2.7)$$

де:  $\eta_{\text{заг}}$  – загальний ККД (коефіцієнт корисної дії) приводу.

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{чп}} \cdot \eta_{\text{лп}} \cdot \eta_{\text{шп}}^2 \cdot \eta_{\text{м}}, \quad (2.8)$$

де:  $\eta_{\text{чп}}$ ,  $\eta_{\text{лп}}$ ,  $\eta_{\text{шп}}$ ,  $\eta_{\text{м}}$  – ККД окремих кінематичних пар (черв'ячної передачі, ланцюгової передачі, підшипників, сполучної муфти). Значення ККД вибираємо як середні значення з рекомендованого діапазону [8].

В результаті розрахунків отримаємо:

$$\eta_{\text{заг}} = 0,7 \cdot 0,96 \cdot 0,99^2 \cdot 0,98 = 0,64.$$

$$P_{\text{дв}}^{\text{розр}} = \frac{1,69}{0,64} = 2,65 \text{ кВт.}$$

Визначаємо значення потужності на першому валу приводу:

$$P_1 = P_{\text{дв}}^{\text{розр}} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{шп}}, \quad (2.9)$$

$$P_1 = 2,65 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 2,57 \text{ кВт.}$$

Потужність на другому валу приводу визначається:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{1-2}, \quad (2.10)$$

де:  $\eta_{1-2}$  – ККД від першого валу до другого.

$$\eta_{1-2} = \eta_{\text{чп}} \cdot \eta_{\text{шп}}, \quad (2.11)$$

$$P_2 = 2,57 \cdot 0,7 \cdot 0,99 = 1,78 \text{ кВт.}$$

Потужність на третьому валу приводу визначається:

$$P_3 = P_2 \cdot \eta_{2-3}, \quad (2.12)$$

де:  $\eta_{2-3}$  – ККД від другого валу до третього.

$$\eta_{2-3} = \eta_{\text{шп}} \cdot \eta_{\text{шп}}, \quad (2.13)$$

$$P_3 = 1,78 \cdot 0,96 \cdot 0,99 = 1,69 \text{ кВт.}$$

Далі проводимо кінематичний розрахунок приводу.

Орієнтовне значення загального передаточного числа приводу:

$$U_{\text{заг}}^{\text{оп}} = U_{\text{чп}}^{\text{оп}} \cdot U_{\text{цп}}^{\text{оп}}, \quad (2.14)$$

де:  $U_{\text{зп}}, U_{\text{цп}}$  – орієнтовні значення передавальних чисел передач приводу (вибираються як середні значення з рекомендованого діапазону для відповідних передач) [8].

$$U_{\text{заг}}^{\text{оп}} = 15 \cdot 3 = 45.$$

Орієнтовне значення кутової швидкості валу двигуна:

$$\omega_{\text{дв}}^{\text{оп}} = \omega_{\text{вих}} \cdot U_{\text{заг}}^{\text{оп}}, \quad (2.15)$$

$$\omega_{\text{вих}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{т}}}{30}, \quad (2.16)$$

$$\omega_{\text{вих}} = \frac{\pi \cdot 15}{30} = 1,57 \text{ с}^{-1}.$$

$$\omega_{\text{дв}}^{\text{оп}} = 1,57 \cdot 45 = 70,65 \text{ с}^{-1}.$$

Таким чином маємо орієнтовне розрахункове значення частоти обертання валу двигуна:

$$n_{\text{дв}}^{\text{оп}} = \frac{30}{\pi} \cdot \omega_{\text{дв}}^{\text{оп}}, \quad (2.17)$$

$$n_{\text{дв}}^{\text{оп}} = \frac{30}{3,14} \cdot 70,65 = 674 \text{ хв}^{-1}.$$

Вибираємо стандартний електродвигун з каталогу [13] з потужністю та дійсною частотою обертання  $n_{\text{дв}}$ , яка близька до значення  $n_{\text{дв}}^{\text{оп}}$ .

Приймаємо електродвигун типу АІР112 МВ8 потужністю 3 кВт, характеристики якого запишемо в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри двигуна АІР112 МВ8

Тип двигуна	$P_{\text{н}}$ , кВт	$n_{\text{о}}$ , об/хв	$M_{\text{макс}}/$ $M_{\text{н}}$	$M_{\text{пуск}}/$ $M_{\text{н}}$	$U_{\text{н}}$ , В	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
АІР 112 МВ8	3	750	2,2	1,9	380	79,5	0,74	0,025

Кутова швидкість валу електродвигуна і першого валу приводу рівні між собою:

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_1 = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв}}^{\text{табл}}}{30}, \quad (2.18)$$

де:  $n_{\text{дв}}^{\text{табл}}$  – синхронна частота обертання обраного стандартного електродвигуна,  $\text{хв}^{-1}$ .

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_1 = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,54 \text{ с}^{-1}.$$

Фактичне загальне передавальне число приводу:

$$U_{\text{заг}} = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{вих}}}, \quad (2.19)$$

$$U_{\text{заг}} = \frac{78,54}{1,57} = 50.$$

Проводимо розбивку розрахованого передавального числа по окремим ступеням приводу:

$$U_{\text{заг}} = U_{\text{чп}} \cdot U_{\text{цп}}, \quad (2.20)$$

$$U_{\text{чп}} = 20, U_{\text{цп}} = 2,5,$$

$$U_{\text{заг}} = 20 \cdot 2,5 = 50.$$

Визначаємо кутові швидкості  $\omega_i$  валів приводу:

$$\omega_1 = \omega_{\text{дв}} = 78,54 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{U_{\text{чп}}}, \quad (2.21)$$

$$\omega_2 = \frac{78,54}{20} = 3,93 \text{ с}^{-1}.$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{U_{\text{чп}} \cdot U_{\text{цп}}}, \quad (2.22)$$

$$\omega_3 = \frac{78,54}{20 \cdot 2,5} = 1,57 \text{ с}^{-1}.$$

### 2.1.3. Розрахунок ланцюгової передачі

Основним критерієм працездатності ланцюгової передачі є зносостійкість шарнірів ланцюга. Необхідна довговічність ланцюга забезпечується за рахунок обмеження тиску  $q_0$  в шарнірах.

Ланцюгові передачі (рис. 2.3) зазвичай використовують на тихохідних ступенях приводу, де передається відносно невелика потужність (до 80 кВт). Для таких випадків застосовують роликові, втулкові або зубчасті ланцюги з різним значенням кроку. Основним параметром, що визначає габаритні розміри та експлуатаційні характеристики приводного ланцюга, є крок  $P$ .

Проектування ланцюгових передач передусім залежить від правильного вибору типорозміру ланцюга, що встановлюють у процесі розрахунку, виходячи з допустимого середнього тиску в шарнірах і заданої міжосьової відстані [8].

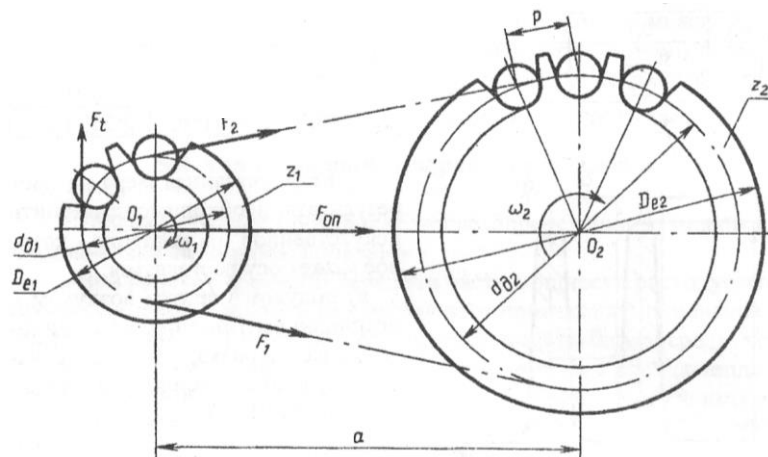


Рисунок 2.3 – Ланцюгова передача

Проведемо розрахунок ланцюгової передачі, використовуючи методіку джерела [8].

Спочатку визначаємо орієнтовне значення кроку ланцюга  $t$  (мм), виходячи з допустимого тиску в ланцюгових шарнірах за виразом з [8]:

$$t \geq 2,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{1000 \cdot T_3 \cdot K_e}{z_3 \cdot [p] \cdot m}}, \quad (2.23)$$

де  $K_e$  – значення коефіцієнту експлуатації;

$z_3$  – кількість зубів малої зірочки;

$[p]$  – допустимий середній тиск, МПа;

$m$  – число рядів ланцюга.

$$K_e = K_d \cdot K_a \cdot K_n \cdot K_{рег} \cdot K_{см} \cdot K_{реж}, \quad (2.24)$$

де:  $K_d$  – коефіцієнт динамічності навантаження,

$K_a$  – коефіцієнт для врахування міжосьової відстані,

$K_n$  – коефіцієнт для врахування кута нахилу передачі,

$K_{рег}$  – коефіцієнт для врахування регульованості передачі,

$K_{см}$  – коефіцієнт для врахування характеру мастила,

$K_{реж}$  – коефіцієнт для врахування режиму роботи передачі.

$$K_e = 1,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,25 \cdot 1,3 \cdot 1 = 2,0.$$

Оптимальне число зубів ведучої зірочки визначаємо за формулою:

$$z_3 = 29 - 2 \cdot U_{цп}, \quad (2.25)$$

$$z_3 = 29 - 2 \cdot 2,6 \approx 23 \text{ шт.}$$

Далі визначаємо число зубів веденої зірочки за формулою:

$$z_4 = z_3 \cdot U_{цп}, \quad (2.26)$$

$$z_4 = 23 \cdot 2,6 \approx 61 \text{ шт.}$$

Тоді отримаємо:

$$t = 2,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{1000 \cdot 255,3 \cdot 2,0}{23 \cdot 22 \cdot 1}} = 28,1 \text{ мм.}$$

Вибираємо ланцюг ПР- 25,4. У таблиці 2.2 представлені характеристики обраного роликового ланцюга.

Таблиця 2.2 – Розміри і параметри привідного роликового ланцюга

Розміри, мм						Q, кН	q, кг/м	A <sub>оп</sub> , мм <sup>2</sup>
t	d	d <sub>1</sub>	b	B <sub>вн</sub>	h			
25,4	7,95	15,88	39	15,88	24,2	60	2,6	179,7

Проведемо перевірочний розрахунок ланцюгової передачі.

Такий розрахунок виконують за допустимою частотою обертання ( $n_1$ ) малої зірочки, а також за питомим тиском в шарнірах ланцюга  $[p]$  і запасу міцності  $[S]$ .

Розрахунок за **допустимою частотою обертання**  $[n_1]$ .

Даний розрахунок виконується з метою зменшення динамічних навантажень на ланцюг і зірочки за умови, що допускається для ланцюга з кроком  $t = 25,4$ , швидкістю  $234,1$  об/хв і частоті обертання  $[n_1] = 630$  хв<sup>-1</sup>:

$$n_1 \leq [n_1], \quad (2.27)$$

$$234,1 < 630 \text{ об/хв.}$$

Умова виконуються.

Далі проведемо розрахунок за **питомим тиском**  $p$  в шарнірах.

Цей розрахунок виконуємо для забезпечення зносостійкості ланцюга за умовою. Для цього ланцюга при  $234,1$  об/хв значення питомого тиску в шарнірах  $[p] = 22,0$  МПа.

$$p = \frac{F_{\text{ц}} \cdot K_3}{A_{\text{он}}} \leq [p], \quad (2.28)$$

де:  $F_{\text{ц}}$  – центробіжна сила, Н.

$$F_{\text{ц}} = \frac{T_2 \cdot \omega_2}{v}, \quad (2.29)$$

де:  $T_2$  – крутний момент на валу меншої зірочки, Н·м;

$v$  – швидкість ланцюга, м/с.

$$v = \frac{z_3 \cdot t \cdot n_3}{60000}, \quad (2.30)$$

$$v = \frac{23 \cdot 25,4 \cdot 234,1}{60000} = 2,3 \text{ м/с.}$$

$$F_{\text{ц}} = \frac{106,1 \cdot 24,5}{2,3} = 1130,2 \text{ Н.}$$

Уточнюємо по таблиці з [8] величину допустимого тиску:

$$[p] = 22 \cdot (1 + 0,01 \cdot (23 - 17)) = 23,3 \text{ МПа.}$$

Маємо тиск:

$$p = \frac{1130,2 \cdot 2,0}{179,7} = 12,6 \text{ МПа.}$$

Умова виконується, так як  $p < [p]$ :

$$12,6 < 22,3.$$

Проведемо уточнення міжосьові відстані  $a_y$ .

$$a_y = 0,25 \cdot t \cdot \left( W - K_{z3} + \sqrt{(W - K_{z3})^2 - 8 \cdot K_{z4}^2} \right), \quad (2.31)$$

де:  $W$  – число ланок ланцюга, його розраховуємо за формулою

$$W = K_{z3} + \frac{2 \cdot a}{t} + K_{z4}^2 \cdot \frac{t}{a}, \quad (2.32)$$

де:  $K_{z1}$  і  $K_{z2}$  – допоміжні коефіцієнти.

$$K_{z3} = \frac{z_3 + z_4}{2}, \quad (2.33)$$

$$K_{z4} = \frac{z_4 - z_3}{2 \cdot \pi}, \quad (2.34)$$

$a$  – попередня міжосьова відстань, мм.

$$a = (30 \div 50) \cdot t, \quad (2.35)$$

$$a = 40 \cdot 25,4 = 1016 \text{ мм.}$$

$$K_{z3} = \frac{23 + 61}{2} = 42. \quad K_{z4} = \frac{61 - 23}{2 \cdot \pi} = 6,1.$$

Відтепер отримуємо значення  $W$

$$W = 42 + \frac{2 \cdot 1016}{25,4} + 6,1^2 \cdot \frac{25,4}{1016} = 122,9.$$

$$a_y = 0,25 \cdot 25,4 \cdot \left( 122,9 - 42 + \sqrt{(122,9 - 42)^2 - 8 \cdot 6,1^2} \right) = 1016 \text{ мм.}$$

Для вільного провисання ланцюга передбачаємо можливість зменшення міжосьової відстані на 0,4%, тобто  $a_y = 1012 \text{ мм.}$

На рисунку 2.4 представлений зовнішній вигляд роликів ланцюга.

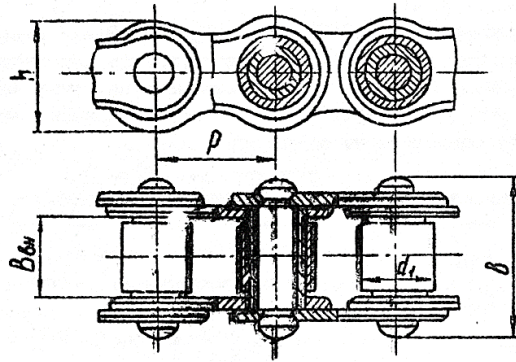


Рисунок 2.4 – Вигляд роликового ланцюга

Далі проведемо перевірку ланцюга за запасом міцності [S]

$$S = \frac{Q}{F_{ш} \cdot K_d + F_f + F_v} \geq [S], \quad (2.36)$$

де: Q – руйнівне навантаження, Н;

$F_f$  – натяг від сили тяжіння ланцюга, Н.

$$F_f = 9,81 \cdot q \cdot a_y \cdot K_f, \quad (2.37)$$

де: q – маса 1 метра ланцюга, кг/м;

$K_f$  – коефіцієнт, що враховує провисання ланцюга:

$$K_f = 6 - \frac{\alpha^2}{10^4} - 0,0456 \cdot \alpha, \quad (2.38)$$

де:  $\alpha$  – кут нахилу центрів зірочок до горизонту, град;

$F_v$  – натяг ланцюга від відцентрової сили, Н:

$$F_v = q \cdot v^2, \quad (2.39)$$

[S] – допустиме значення коефіцієнтів безпеки. [S] = 8,8 [8].

В результаті розрахунків маємо

$$F_v = 2,6 \cdot 2,3^2 = 13,8 \text{ Н.}$$

$$F_f = 9,81 \cdot 2,6 \cdot 1,012 \cdot 4,5 = 116,2 \text{ Н.}$$

$$S = \frac{60000}{1130,2 \cdot 1,25 + 116,2 + 13,8} = 38,9.$$

Умова виконується, так як  $S > [S]$ .

$$38,9 > 8,8.$$

Визначаємо рекомендовану монтажну відстань

$$a_m = (0,996 \div 0,998) \cdot a_y, \quad (2.40)$$

$$a_m = 0,996 \cdot 1012 = 1008 \text{ мм.}$$

Навантаження на валу зірочок буде рівним

$$F_B = F_{\text{щ}} + 2 \cdot F_f, \quad (2.41)$$

$$F_B = 1130,2 + 2 \cdot 116,2 = 1362,6 \text{ Н.}$$

#### 2.1.4. Перевірка вибраного двигуна

Проведемо перевірку двигуна на можливе перегрівання внаслідок перевантаження, користуючись методикою джерела [15]:

Перевірку виконаємо за формулою:

$$M_{\text{СТД}} \leq 0,9M_{\text{НОМ}}; \quad (2.42)$$

Номінальний момент (враховуємо номінальну швидкість обертання двигуна  $n_{\text{НОМ}} = 707$  об/хв):

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}}; \quad (2.43)$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \cdot \frac{3,0}{707} = 40,52 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Величину статичного моменту визначаємо через розрахункову потужність обраного двигуна:

$$M_{\text{СТ}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ДВ}}}{n_{\text{НОМ}}}; \quad (2.44)$$

$$M_{\text{СТ}} = 9550 \cdot \frac{2,65}{707} = 35,80 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Перевіряємо умову:

$$M_{\text{СТД}} \leq 0,9M_{\text{НОМ}};$$

$$0,9 \cdot M_{\text{НОМ}} = 0,9 \cdot 40,2 = 36,47 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$36,47 \geq 35,80 .$$

Так як умова виконується, то можна зробити висновок, що обраний двигун забезпечить надійну роботу даного механізму.

## 2.2 Розрахунок основних елементів силової схеми

### 2.2.1 Розрахунок елементів інверторного вузла

Спочатку розраховуємо величину максимального струму через ключі інвертора з врахуванням потужності та напруги двигуна:

$$I_{c\max c} = \frac{P_H K_1 \sqrt{2K_2}}{\sqrt{3} U_H \cos \phi \eta_H}; \quad (2.45)$$

$$I_{c\max c} = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 1,3 \sqrt{2 \cdot 1,2}}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,795 \cdot 0,74} = 15,60 \text{ А.}$$

$K_1=1,3$  – коефіцієнт, що характеризує допустиме короткочасне перевантаження за струмом;

$K_2=1,2$  – коефіцієнт, що характеризує допустиму миттєву пульсацію струму;

$\eta_H=0,89$  – величина номінального ККД двигуна.

Вибираємо транзистор IRG4BC20KD фірми IR з характеристиками:

- величина робочого струму:  $I_c = 40 \text{ А}$ ;
- величина напруги насичення (при  $25^\circ\text{C}$ ):
- $U_{ce(sat)} = 2,27 \text{ В}$ ;
- клас за напругою:
- $U_{ce} = 600 \text{ В}$ .

Схема підключення IGBT-транзистора представлена на рисунку 2.5.

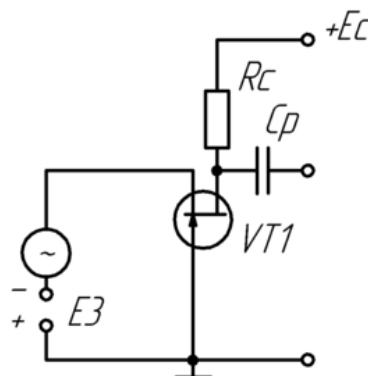


Рисунок 2.5 – Схема підключення IGBT-транзистора

Проведемо розрахунок втрат в IGBT транзисторі. Визначимо втрати в провідному стані:

$$P_{ss} = I_{cp} U_{ce} \left[ \frac{1}{8} + \frac{D}{3} \cos \theta \right]; \quad (2.46)$$

$$P_{ss} = 15,60 \cdot 2,2 \cdot \left[ \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3} \cdot 0,90 \right] = 14,07 \text{ Вт.}$$

де  $I_{cp}$  – амплітуда струму на виході інвертора,  $I_{cp} = I_{c, \max} / k_1 = 15,6 / 1,3 = 12 \text{ А}$ ;

$D$  – величина скважності,  $D = 0,95$ ;

$\cos \theta$  – величина коефіцієнта потужності,  $\cos \theta = \cos \varphi = 0,74$

$U_{ce}$  – падіння напруги на транзисторі в стані насичення,  $U_{ce} = 2,2 \text{ В}$ .

Відтепер визначимо втрати IGBT-транзистора при комутації:

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(I_{cp} \cdot U_{cc})(t_{c(on)} + t_{c(off)}) f_{sw}}{2}; \quad (2.47)$$

$$P_{sw} = \frac{1}{3,14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(12 \cdot 513)(0,4 + 0,7) \cdot 10^{-6}}{2} = 7,63 \text{ Вт.}$$

Тут  $t_{c(on)}$  – час перехідних процесів в колекторному колі на відкриття транзистора,  $t_{c(on)} = 0,4 \text{ мкс}$ ;

$t_{c(off)}$  – час перехідних процесів в колекторному колі на закриття транзистора,  $t_{c(off)} = 0,7 \text{ мкс}$ ;

$U_{cc}$  – величина напруги на колекторі IGBT (напруга ланки постійного струму для системи АІН-ШІМ),  $U_{cc} = 513 \text{ В}$ .

Отримуємо сумарні втрати в транзисторі:

$$P = P_{ss} + P_{sw}; \quad (2.48)$$

$$P = 14,07 + 7,63 = 21,7 \text{ Вт.}$$

Розраховуємо втрати в діоді в провідному стані:

$$P_{ds} = I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot \left[ \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \theta \right]; \quad (2.49)$$

$$P_{ds} = 12 \cdot 2 \cdot \left[ \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot 3,14} \cdot 0,74 \right] = 4,79 \text{ Вт.}$$

Тут  $I_{ep}$  – амплітуда струму через зворотний діод,  $I_{ep}=I_{cp}=12 \text{ А}$ ;

$U_{ec}$  – величина падіння напруги на зворотному діоді в провідному стані.

$U_{ec}=2 \text{ В}$ .

Далі розраховуємо втрати на відновлення замикаючих властивостей діода:

$$P_{dr} = \frac{1}{8} (I_{rr} \cdot U_{ce} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw}); \quad (2.50)$$

$$P_{dr} = \frac{1}{8} (12 \cdot 513 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10000) = 1,54 \text{ Вт.}$$

Тут  $I_{rr}$  – величина амплітуди зворотного струму через діод,  $I_{rr} = 12 \text{ А}$ ;

$t_{rr}$  – величина тривалості імпульсу зворотного струму,  $t_{rr} = 0,2 \text{ мкс}$ .

Отримуємо сумарні втрати діода:

$$P_d = P_{ds} + P_{dr}; \quad (2.51)$$

$$P_d = 4,79 + 1,54 = 6,03 \text{ Вт.}$$

Тоді результуючі втрати в транзисторі зі зворотним діодом:

$$P_T = P_Q + P_d; \quad (2.52)$$

$$P_T = 21,7 + 6,03 = 27,73 \text{ Вт.}$$

### 2.2.2 Розрахунок вентилів випрямляча

Спочатку розраховуємо середню випрямлену напругу:

$$U_d = K_{ch} U_n; \quad (2.53)$$

$$U_d = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В.}$$

де коефіцієнт  $K_{ch}=1,35$ .

Тоді величина максимального значення середнього випрямленого струму:

$$I_{dm} = \frac{\left( \sqrt{3 \cdot \left( \frac{I_{cmaks}}{\sqrt{2}} \cdot U_n \cos \varphi + n \cdot P_T \right)} \right)}{U_d}; \quad (2.54)$$

$$I_{dm} = \frac{\left( \sqrt{3 \cdot \left( \frac{15,60}{\sqrt{2}} \cdot 380 \cdot 0,74 + 3 \cdot 21,7 \right)} \right)}{513} = 0,19 \text{ A.}$$

Тут  $n$  – кількість пар транзисторів в інверторі, маємо  $n = 3$ .

Розраховуємо величину максимального робочого струму через діод:

$$I_{vm} = K_{зз} I_{dm}; \quad (2.55)$$

$$I_{vm} = 1,045 \cdot 0,19 = 0,20 \text{ A.}$$

де:  $K_{зз} = 1,045$ .

Далі розраховуємо максимальну зворотну напругу вентиля:

$$U_{vm} = K_{зп} \cdot \sqrt{2} \cdot U_n K_{сн} K_c + \Delta U_n; \quad (2.56)$$

$$U_{vm} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 130 = 1091 \text{ В.}$$

Тут  $K_c$  – коефіцієнт допустимого підвищення напруги мережі,  $K_c = 1,1$ ;

$\Delta U_n$  – запас на комутаційні викиди напруги в ланці постійного струму,

$\Delta U_n = 130 \text{ В}$ .

Вентилі вибираються за постійним робочим струмом і за величиною напруги:

$$I_B \geq I_{v.m};$$

$$U_B \geq \frac{U_{v.m}}{100};$$

Відповідно до цієї умови було обрано діод типу HFA06TB120 з наступними параметрами:

- повторювана пікова зворотна напруга  $U_R = 1200 \text{ В}$ ;
- середній струм діода  $I_{ср} = 6 \text{ А}$ ;
- максимальна потужність  $P_{макс} = 62,5 \text{ Вт}$ ;
- пряме падіння напруги  $U_{пр} = 3,9 \text{ В}$ .

### 2.3 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Асинхронний двигун може бути представлений наступною системою двох векторних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\psi}_s}{dt} \\ \tilde{U}_r = R_r \tilde{I}_r + \frac{d\tilde{\psi}_r}{dt} \end{cases}; \quad (2.57)$$

де  $R_s, R_r$  – активні опори статора і ротора відповідно, Ом;

$\tilde{I}_s, \tilde{I}_r$  – вектори струму статора і ротора в трифазній системі координат, А;

$\tilde{U}_s, \tilde{U}_r$  – вектори напруги статора і ротора в трифазній системі координат, В;

$\tilde{\psi}_s, \tilde{\psi}_r$  – вектори потокозчеплення статора і ротора в трифазній системі координат.

Система рівнянь (2.57) може бути зведена до рівнянь балансу напруг на статорі та роторі в еквівалентній двофазній асинхронній машині, поданих у системі координат, пов'язаній зі статором і такої, що може обертатися з довільною кутовою швидкістю  $\omega_k$ :

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\psi}_s \\ \tilde{U}_r = R_r \tilde{I}_r + \frac{d\tilde{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\psi}_r \end{cases}; \quad (2.58)$$

де:  $j\omega_k \tilde{\psi}_s$  та  $j\omega_k \tilde{\psi}_r$  – величини ЕРС обертання в рівняннях для відповідних обмоток, що є пропорційними довільній швидкості обертання  $\omega_k$ ;

$j\omega_r \tilde{\psi}_r$  – ЕРС, індукована в роторі, що пропорційна приведеній кутовій швидкості його обертання відносно швидкості електромагнітного поля швидкості електромагнітного поля на статорі  $\omega_r$ .

У системі рівнянь (2.58) потокозчеплення можуть бути представлені таким чином:

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_s = L_s \tilde{I}_s + L_m \tilde{I}_r; \\ \tilde{\Psi}_r = L_m \tilde{I}_s + L_r \tilde{I}_r; \end{cases} \quad (2.59)$$

де  $L_s = L_m + L_{s\sigma}$  ;  $L_r = L_m + L_{r\sigma}$  – величини повних індуктивностей фаз статора і ротора еквівалентної двофазної машини (відповідно);

$L_m$  – головна взаємоіндуктивність між фазою статора і фазою ротора;

$L_{s\sigma}$ ,  $L_{r\sigma}$  – індуктивності розсіювання статора і ротора відповідно.

Також для еквівалентної машини можна записати співвідношення:

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_s = \tilde{\Psi}_m + L_{s\sigma} \tilde{I}_s; \\ \tilde{\Psi}_r = \tilde{\Psi}_m + L_{r\sigma} \tilde{I}_r; \end{cases} \quad (2.60)$$

де  $\tilde{\Psi}_m = L_m \tilde{I}_m$  – вектор потокозчеплення в повітряному проміжку машини;

$\tilde{I}_m = \tilde{I}_s + \tilde{I}_r$  – вектор від струму намагнічування машини.

Щоб отримати рівняння асинхронного двигуна, які зв'язують координати у встановлених режимах, слідє прийняти наступне:  $\omega_k = \omega_s = 2\pi f$  та  $d/dt=0$ .

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + j\omega_k \tilde{\Psi}_s \\ \tilde{U}_r = R_r \tilde{I}_r + j(\omega_s - \omega_r) \tilde{\Psi}_r \end{cases}; \quad (2.61)$$

Підставивши (2.60) в рівняння(2.61), отримаємо:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = (R_s + jX_s) \tilde{I}_s + jX_m \tilde{I}_r \\ \frac{\tilde{U}_r}{s} = \left( \frac{R_r}{s} + jX_r \right) \tilde{I}_r + jX_m \tilde{I}_s \end{cases}; \quad (2.62)$$

де  $X_s = X_m + X_{s\sigma}$ ,  $X_r = X_m + X_{r\sigma}$  – індуктивні опори статора і ротора відповідно, Ом;

$S$  - ковзання

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; \quad (2.63)$$

де  $\omega_0$  – синхронна швидкість двигуна;

$\omega$  – робоча (номінальна) швидкість.

На рисунку 2.6 зображена схема заміщення асинхронного двигуна, що відповідає отриманій системі рівнянь (2.62):

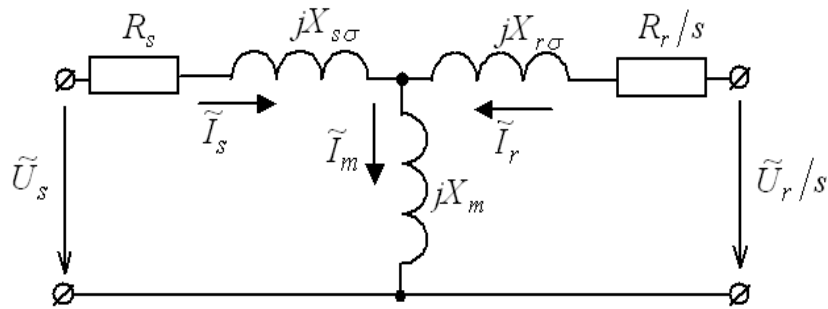


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна

Використовуючи дану еквівалентну схему та метод накладення, можна вивести аналітичні вирази для струмів на статорі і роторі:

$$\begin{cases} \tilde{I}_s = \frac{\tilde{U}_s}{\bar{Z}_{0s}} - \frac{\tilde{U}_r}{s\bar{Z}_{0r}} \cdot \frac{jX_m}{R_s jX_s} \\ \tilde{I}_r = \frac{\tilde{U}_r}{s\bar{Z}_{0r}} - \frac{\tilde{U}_s}{\bar{Z}_{0s}} \cdot \frac{jX_m}{R_r / s + jX_r} \end{cases}; \quad (2.64)$$

де  $\bar{Z}_{0s}$ ,  $\bar{Z}_{0r}$  – величини комплексних опорів АД відповідно при короткозамкнених обмотках ротора (з боку статора) і статора (з боку ротора).

$$\begin{cases} \bar{Z}_{0s} = \left[ R_s + \frac{R_r}{s} \cdot \frac{X_m^2}{(R_r / s)^2 + X_r^2} \right] + j \cdot \left[ X_{s\sigma} + X_m \frac{(R_r / s)^2 + X_r X_{r\sigma}}{(R_r / s)^2 + X_r^2} \right]; \\ \bar{Z}_{0s} = \left[ R_s + \frac{R_r}{s} \cdot \frac{X_m^2}{(R_r / s)^2 + X_r^2} \right] + j \cdot \left[ X_{s\sigma} + X_m \frac{(R_r / s)^2 + X_r X_{r\sigma}}{(R_r / s)^2 + X_r^2} \right] \\ \bar{Z}_{0r} = \left[ \frac{R_r}{s} + R_s \frac{X_m^2}{R_s^2 + X_s^2} \right] + j \cdot \left[ X_{r\sigma} + X_m \frac{R_s^2 + X_s X_{s\sigma}}{R_s^2 + X_s^2} \right] \end{cases} \quad (2.65)$$

Будемо вважати, що при розгляді асинхронних короткозамкнених двигунів напруга, прикладена до ротора, дорівнює нулю:

$$\tilde{U}_r = 0; \quad (2.66)$$

Тоді рівняння (2.64) можуть бути відповідно спрощені. В інших же випадках, якщо в колі ротора є джерело енергії, спрощене рівняння не буде справедливим.

Величину електромагнітного моменту можна визначити за відомою спрощеною формулою Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s}; \quad (2.67)$$

також можна визначити за уточненою формулою:

$$M = \frac{2M_k(1 + \xi)}{s/s_k + s_k/s + 2\xi}; \quad (2.68)$$

де  $M_k$  – максимальний (критичний) момент двигуна;

$s_k$  – критичне ковзання двигуна;

$$\xi = \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + X_k^2}} = \frac{R_s}{R_r} s_k \quad \text{– коефіцієнт уточнення;}$$

Тоді:

$$M_k \approx \pm \frac{3U_s^2}{4\omega_0(\sqrt{R_s^2 + X_k^2} \pm R_s)}; \quad (2.69)$$

де  $U_s$  – величина амплітуди вектору напруги статора.

Маємо вираз

$$s_k \approx \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + X_k^2}}; \quad (2.70)$$

Де  $X_k = X_{s\sigma} + X_{r\sigma}$  – індуктивний опір короткого замикання.

У (2.69) та (2.70) знак «+» має місце в рухомому (двигунному) режимі, а знак «-» – в генераторному.

Розрахуємо основні параметри схеми заміщення АД, використовуючи його характеристики, приведені в таблиці 2.2. Тривалість включення двигуна вважаємо стовідсотковою.

Номинальне ковзання – синхронна частота обертання  $n_0 = 750 \text{ об / хв}$ ,  
номинальна  $n = 707 \text{ об / хв}$ .

$$S = \frac{n_0 - n_n}{n_0}; \quad (2.71)$$

$$S = \frac{750 - 707}{750} = 0,058.$$

Критичне ковзання можна розрахувати за відомою формулою:

$$S_K = S_n \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right); \quad (2.72)$$

Де  $\lambda_m$  – перевантаження за моментом,  $\lambda = 2,2$ .

Тоді отримаємо:

$$S_K = 0,058 \cdot \left( 2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,241.$$

Механічні втрати потужності обчислюються за наступною формулою:

$$\Delta P = \left( U_n + \sqrt{3} I_\phi \cos \varphi_n - P_n \right) \left( 1 + \frac{n_n^2}{1000^2} \right) \cdot 0,05; \quad (2.73)$$

де  $U_n$  – величина лінійної напруги двигуна, В. Маємо  $U_n = 380$ ;

$I_\phi$  – номінальний фазний струм двигуна, маємо  $I_\phi = 4,47 \text{ А}$ ;

$\cos \varphi_n$  – номінальний коефіцієнт потужності,  $\cos \varphi_n = 0,74$ ;

$$\Delta P = \left( 380 + \sqrt{3} \cdot 4,47 \cdot 0,74 - 3 \right) \left( 1 + \frac{707^2}{1000^2} \right) \cdot 0,05 = 28,7 \text{ Вт.}$$

Опір фази статора визначаємо таким чином:

$$R_s = 3 \left( \frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - S_n}{2 b_k \left( 1 + \frac{b_k}{s_k} \right) \lambda_m (P_n - \Delta P)}; \quad (2.74)$$

де  $b_k$  – додатковий коефіцієнт,  $b_k = 1 + s_k = 1 + 0,241 = 1,241$ ;

$$R_s = 3 \left( \frac{380}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - 0,058}{2 \cdot 1,241 \left( 1 + \frac{1,241}{0,241} \right) 2,2 \cdot (3000 - 28,7)} = 1,363 \text{ Ом.}$$

Опір фази ротора:

$$R_r = \frac{R_H + \Delta P}{3 \left( 1 - s_H + \frac{b_k}{s_k} \right) \cdot \lambda_1 \cdot I_\phi^2}; \quad (2.75)$$

де  $\lambda_1$  – допустиме перевантаження за струмом для вибраного двигуна,  $\lambda_1=5$ .

Розраховуємо цю величину опору

$$R_r = \frac{3000 + 28,7}{3 \left( 1 - 0,058 + \frac{1,241}{0,241} \right) \cdot 5 \cdot 4,47^2} = 1,659 \text{ Ом.}$$

Індуктивність статора:

$$L_s = \frac{U_\pi}{2\sqrt{3} \cdot \pi \cdot 50 \cdot I_\phi \cdot \left( \sqrt{1 - \cos \varphi_H} - \cos \varphi_H \frac{s_H}{s_k} \right)}; \quad (2.76)$$

$$L_s = \frac{380}{2\sqrt{3} \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4,47 \cdot \left( \sqrt{1 - 0,74} - 0,74 \frac{0,058}{0,241} \right)} = 0,471 \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання фазної обмотки статора:

$$L_{s6} = \frac{\sqrt{\left( \frac{U_\pi}{\lambda_1 I_\phi \sqrt{3}} \right)^2 - (R_s + R_r)^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50}; \quad (2.77)$$

$$L_{s6} = \frac{\sqrt{\left( \frac{380}{5 \cdot 4,47 \sqrt{3}} \right)^2 - (1,363 + 1,659)^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,03 \text{ Гн.}$$

Для подальших розрахунків припускаємо, що величини індуктивності статора та приведеної індуктивності обмотки ротора приблизно рівні, тобто:

$$L_r = L_s = 0,471 \text{ Гн.}$$

Тоді індуктивність головного магнітного контуру визначається за формулою:

$$L_m = L_s - L_{s\sigma}; \quad (2.78)$$

$$L_m = 0,471 - 0,03 = 0,441 \text{ Гн.}$$

Розраховані вище параметри схеми заміщення далі використовуємо при моделюванні електричної машини. Для більше наявного її представлення вони зведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахункові параметри схеми заміщення

Величина	Найменування	Значення
Активний опір статора	$R_s$ Ом	1,363
Приведений активний опір ротора	$R_r$ Ом	1,659
Індуктивність статора	$L_s$ Гн	0,471
Приведена індуктивність ротора	$L_r$ Гн	0,441
Індуктивність розсіювання статора	$L_{s\sigma}$ Гн	0,03

#### 2.4 Розрахунок динамічних параметрів двигуна

Для побудови структурної схеми та отримання динамічних характеристик двигуна окрім розглянутих вище статичних параметрів, треба використати декілька типових динамічних значень. Розрахуємо параметри, які будуть необхідні для моделювання.

Коефіцієнт магнітного зв'язку статора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}; \quad (2.79)$$

$$k_s = \frac{0,441}{0,471} = 0,936.$$

Коефіцієнт магнітного зв'язку ротора:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad (2.80)$$

$$k_r = \frac{0,441}{0,471} = 0,936.$$

Розраховуємо приведену індуктивність статора:

$$L'_s = (1 - k_s k_r) L_s, \quad (2.81)$$

$$L'_s = (1 - 0,936 \cdot 0,936) \cdot 0,471 = 0,058 \text{ Гн.}$$

Розраховуємо приведену індуктивність ротора:

$$L'_r = (1 - k_s k_r) L_r, \quad (2.82)$$

$$L'_r = (1 - 0,936 \cdot 0,936) \cdot 0,471 = 0,058 \text{ Гн.}$$

Приведена постійна часу статора:

$$T'_r = \frac{L'_s}{R_s}, \quad (2.83)$$

$$T'_r = \frac{0,058}{1,363} = 0,042 \text{ с.}$$

Коефіцієнт розсіювання за Блонделю:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad (2.84)$$

$$\sigma = 1 - \frac{0,441^2}{0,471 \cdot 0,471} = 0,123.$$

Розраховуємо величину приведенного активного опору ротора:

$$r = K_s R_s + R_r, \quad (2.85)$$

$$r = 0,936 \cdot 1,363 + 1,659 = 2,96 \text{ Ом.}$$

Приведена постійна часу ротора:

$$T' = \frac{L'_r}{r}, \quad (2.86)$$

$$T' = \frac{0,058}{2,96} = 0,019 \text{ с.}$$

Постійна часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad (2.87)$$

$$T_r = \frac{0,471}{1,659} = 0,28 \text{ с.}$$

Еквівалентний активний опір двигуна:

$$R_\ell = R_s + K_r^2 R_r, \quad (2.88)$$

$$R_\ell = 1,363 + 0,936^2 \cdot 1,659 = 2,82 \text{ Ом.}$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу статора:

$$T_\ell = \sigma L_s / R_\ell, \quad (2.89)$$

$$T_\ell = 0,123 \cdot 0,471 / 2,82 = 0,021 \text{ с.}$$

## 2.5. Розроблення функціональної схеми електропривода машини

Розглянемо роботу електроприводу з векторною системою керування в системі координат (d - q).

Використання принципу векторного керування дає змогу створювати високодинамічні електромеханічні системи широкого призначення з практично необмеженим діапазоном регулювання швидкості. Як правило, векторне керування реалізує закон частотного регулювання. Необхідні статичні та динамічні характеристики електроприводу забезпечуються завдяки роздільному регулюванню механічних (момент, швидкість) і магнітних (потокозчеплення або магнітний потік) координат. При цьому враховується взаємне розташування узагальнених векторів змінних електромагнітних величин.

У силовій схемі електроприводів з векторним керуванням зазвичай застосовують перетворювач частоти, побудований на базі випрямляча та інвертора напруги (для малих потужностей можливе також використання безпосередніх перетворювачів частоти), при цьому формування вихідної напруги здійснюється за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).



координатних перетворювачів (спочатку до нерухомої ортогональної системи координат  $\alpha, \beta$ , а далі – до трифазної системи А, В, С).

Отримання складових струму статора, які вимірюються за допомогою датчиків струму (ДС), здійснюється шляхом зворотних перетворень. Регулятори внутрішніх контурів регулювання складових струму статора зазвичай виконуються шляхом застосування датчиків Холу.

Виділення сигналів амплітуди та фази вектору  $\psi$  здійснюється у векторному аналізаторі. Сигнал, пропорційний до модуля вектору потокозчеплення ротора, в даній схемі заведений до блок порівняння регулятора потокозчеплення (РП), який зазвичай виконується пропорційно-інтегрального (ПІ) -типу.

Вимірювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна здійснюється за допомогою тахогенератора (ТГ) – датчика швидкості, встановленого на валу машини. Регулятор швидкості (РШ) зазвичай реалізується у вигляді пропорційного регулятора (П-типу) або пропорційно-інтегрального (ПІ-типу), це залежить від потреби забезпечення в системі астатичних властивостей.

Сигнали з виходів регуляторів швидкості РШ та потокозчеплення РП можуть бути обмежені на деяких рівнях, це потрібне для недопущення збільшення струму намагнічення більше за його номінальне значення, а також від появи неприпустимо великих коливань електромагнітного моменту двигуна. Сигнали завдання швидкості обертання та завдання потокозчеплення, що встановлюються задатчиками інтенсивності (ЗІШ та ЗІП), можуть бути організовані незалежно один від одного (бажана величина потокозчеплення ротора та завдання швидкості).

### **Висновок до розділу.**

Проведений розрахунок основних елементів модернізованого електропривода, визначені параметри схеми заміщення асинхронного двигуна; розраховані його динамічні параметри; розроблена функціональна схема системи векторного керування двигуном.

### 3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Синтез регуляторів системи керування електроприводом бобінорізальної машини

Розглянемо налаштування контурів регулювання та розрахунок динамічних характеристик в системі при векторному керуванні швидкістю асинхронного двигуна.

Структурна схема контуру струму без урахування перехресних зв'язків показана на рисунку 3.1. Налаштування виконаємо без урахування впливу перехресних зв'язків.

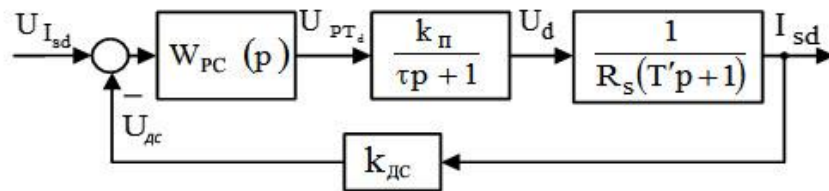


Рисунок 3.1 – Структурна схема контуру струму за віссю d

При заданій частоті широтно-імпульсного моделювання (ШІМ) величина чистого запізнення перетворювача частоти складає значення, яке обернено пропорційне до частоти ШІМ.

У зоні частот, де фазочастотна характеристика ланки чистого запізнювання близька до фазочастотної характеристики аперіодичної ланки з постійною часу  $\tau$ , передавальна функція розімкненого контуру струму статора за віссю d записується у виді:

$$W_{id}(p) = W_{pc4}(p) \frac{k_n}{\tau p + 1} k_{дс} \frac{1}{R_s(T'p + 1)}; \quad (3.1)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт передачі частотного перетворювача;

$\tau$  – постійна часу частотного перетворювача;

$k_{дс}$  – коефіцієнт передачі датчика струму;

$W_{pc4}(p)$  – передавальна функція регулятора струму за віссю d;

$R_s, T'$  – розраховані в попередніх пунктах параметри двигуна.

Під час розрахунків параметрів регулятора струму можна найменшу некомпенсовану постійну часу  $T_{\mu}$  прийняти рівною  $\tau$ . Виходячи з налаштування контуру на модульний оптимум, регулятор струму  $W_{PCd}(p)$  компенсуватиме частину об'єкту:

$$W_{id(1)}(p) = (T_{\mu}p + 1) \frac{k_n}{T_{\mu}p + 1} k_{DC} \frac{1}{R_s (T'p + 1)} = \frac{k_n k_{DC}}{R_s (T'p + 1)}; \quad (3.2)$$

Тоді передавальна функція регулятора може бути визначена таким чином:

$$W_{pcd}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p} W_{id(1)}(p) \frac{T'p + 1}{2 \frac{T_{\mu}}{R_s} k_n k_{DE} p}; \quad (3.3)$$

Отримаємо пропорційно-інтегральний регулятор струму (ПІ-регулятор). З розрахунків, проведених в пункті 2.3 витікає, що  $T_r \gg T'$ , тому в контурі регулювання струму за віссю  $q$  можна застосувати такий же ПІ-регулятор.

Розглянемо контур регулювання потокозчеплення ротора. Для нього контур регулювання струму за віссю  $d$  буде внутрішнім. Передавальна функція замкнутого контуру струму, налаштованого на модульний оптимум, може бути представлена у вигляді коливальної ланки з такою передавальною функцією:

$$W_{sd}(p) = \frac{1}{k_{DC} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu}p + 1)} \approx \frac{1}{k_{DC} (2T_{\mu}p + 1)}; \quad (3.4)$$

Тоді маємо таку структурну схему для контуру потокозчеплення (рис. 3.2):

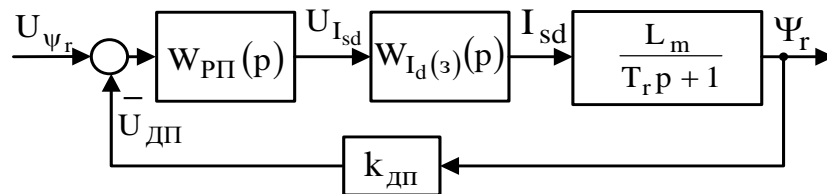


Рисунок 3.2 – Структурна схема контуру потокозчеплення

Для розрахунку параметрів регулятора в контурі, що містить підпорядкований замкнутий контур (в даному випадку – контур струму статора за віссю d), рекомендується розглядати його як аперіодичну ланку з еквівалентною малою постійною часу, рівною подвоєною малою постійною часу підпорядкованого контуру. Якщо внутрішній контур мав малу некомпенсовану постійну часу  $T_{\mu i} = \tau$ , то приймаємо  $T_{\mu \psi} = 2T_{\mu i}$ .

Виходячи з налаштування контуру на модульний оптимум, регулятор  $W_{\text{рп}}(p)$  компенсуватиме частина об'єкту:

$$W_{\psi r(1)}(p) = (T_{\mu i} p + 1) \frac{1}{k_{\text{дс}} (T_{\mu \psi} p + 1)} k_{\text{дп}} \frac{L_m}{T_r p + 1} = \frac{L_m k_{\text{дп}} / k_{\text{дс}}}{T_r p + 1}; \quad (3.5)$$

Тоді передавальна функція регулятора потокозчеплення може бути визначена таким чином:

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu \psi} p W_{\psi r(1)} p} = \frac{T_r p + 1}{2 \frac{T_{\mu \psi}}{k_{\text{дс}}} L_m k_{\text{дп}} p}; \quad (3.6)$$

Таким чином, виходячи з отриманого виразу, можна стверджувати, що регулятор потокозчеплення також буде пропорційно-інтегральним.

Далі налаштуємо контур регулювання електромагнітного моменту двигуна. Вважаючи, що в системі встановлено номінальне потокозчеплення, спростимо структурну схему, замінивши нелінійні блоки в каналі регулювання швидкості коефіцієнтами з множниками, рівними встановленому потокозчепленню. Контур регулювання моменту можна представити у виді, показаному на рисунку 3.3.

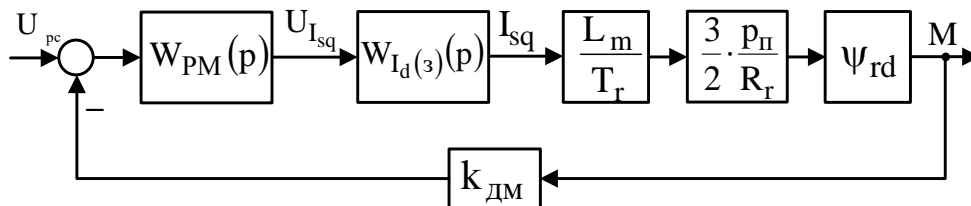


Рисунок 3.3 – Структурна схема контуру моменту

За аналогією з вищенаведеними виразами замкнутий контур регулювання струму за віссю  $q$  можна представити у вигляді:

$$W_{Iq(3)}(p) = W_{Id(3)}(p) = \frac{1}{k_{ДП} (2T_{\mu i} p + 1)}; \quad (3.7)$$

Об'єкт контуру моменту (рис. 3.3) не має великих постійних часу. Його передавальна функція матиме вигляд:

$$W_M(p) = \frac{1}{k_{ДП} (2T_{\mu i} p + 1)} \frac{L_m}{T_r} \frac{3p_n}{2R_r} \psi_{nl} k_{DM}; \quad (3.8)$$

Для налаштування контуру, що не має великих постійних часу, будемо застосувати інтегральний регулятор з передавальною функцією:

$$W_{PM}(p) = \frac{\beta_{PM}}{p}; \quad (3.9)$$

де  $\beta_{PM}$  – динамічний коефіцієнт регулятора моменту, який може бути розрахований таким чином:

$$\beta_{PM}(p) = \frac{1}{2T_{\mu M}} \frac{1}{W_M(p)} \Big|_{p=0} = \frac{k_{ДШ} T_r R_r}{3T_{\mu M} L_m \psi_{rd} p_n k_{DM}}; \quad (3.10)$$

Тоді передавальна функція регулятора моменту буде такою:

$$W_{PM}(p) = \frac{k_{ДС} T_r R_r}{3T_{\mu M} L_m \psi_{rd} p_n k_{DM} p}; \quad (3.11)$$

Виконаємо налаштування контуру швидкості. Об'єкт регулювання для цього контуру матиме інтегруючі властивості, тому для налаштування застосуємо ПІ-регулятор з такою передавальною функцією:

$$W_{PI}(p) = \beta_{PI} \frac{T_{ДШ} p + 1}{T_{PI} p}; \quad (3.12)$$

де  $T_{PI}$  – постійна часу регулятора швидкості.

Динамічний коефіцієнт регулятора швидкості  $\beta_{PI}$  може бути розрахований таким чином:

$$\beta_{\text{рпш}} = \frac{k_{\text{дм}} J_1}{2T_{\mu\omega\text{дш}}}; \quad (3.13)$$

звідси:

$$W_{\text{рпш}}(p) = \frac{k_{\text{дм}} J_1}{8T_{\mu i} k_{\text{дш}}} \cdot \frac{16T_{\mu i} p + 1}{16T_{\mu i} p}; \quad (3.14)$$

Проведемо розрахунок коефіцієнтів регуляторів струму, потокозчеплення ротора, моменту та швидкості.

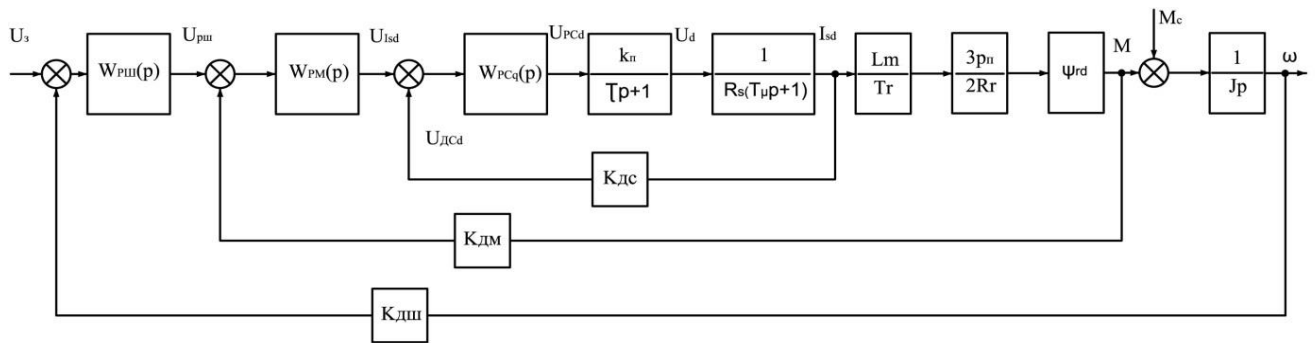


Рисунок 3.4 – Структурна схема електромеханічної системи з векторним керуванням

Спочатку визначимо коефіцієнти регуляторів струму за віссю d і за віссю q:

$$W_{\text{PCd}}(p) = W_{\text{PCq}}(p) = \frac{T'p + 1}{2 \frac{T_{\mu i}}{R_s} k_n k_{\text{дс}} p}; \quad (3.15)$$

$$W_{\text{PCd}}(p) = W_{\text{PCq}}(p) = \frac{0,019p + 1}{2 \frac{0,00025}{1,363} \cdot 44 \cdot 1,118p} = \frac{0,019p + 1}{0,018p};$$

Далі знаходимо коефіцієнти регулятора потокозчеплення:

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{T_k p + 1}{2 \frac{T_{\mu \psi}}{R_r} L_m k_{\text{дп}} p}; \quad (3.16)$$

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{0,28p + 1}{2 \frac{0,0005}{1,659} \cdot 0,441 \cdot 2,54p} = \frac{0,28p + 1}{0,0007p}.$$

Розрахуємо динамічний коефіцієнт регулятора моменту за формулою:

$$\beta_{PM} = \frac{k_{ДС} T_r R_r}{3T_{\mu M} L_m \psi_{r1} p_n k_{DM}}; \quad (3.17)$$

$$\beta_{PM} = \frac{1,118 \cdot 0,28 \cdot 0,025}{3 \cdot 0,0005 \cdot 0,441 \cdot 1,97 \cdot 3 \cdot 0,123} = 16,28.$$

Тоді регулятор моменту матиме передавальну функцію:

$$W_{PM}(p) = \frac{\beta_{PM}}{p}; \quad (3.18)$$

$$W_{PI}(p) = \frac{16,28}{p}.$$

Далі розраховуємо динамічний коефіцієнт регулятора швидкості відповідно до виразу (3.13):

$$\beta_{PШ} = \frac{k_{DM} J_1}{2T_{\mu\omega} k_{ДШ}};$$

$$\beta_{PШ} = \frac{0,123 \cdot 0,025}{2 \cdot 0,001 \cdot 0,068} = 22,61.$$

Початкові дані, необхідні для розрахунку коефіцієнтів регуляторів для наочності занесені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Початкові дані для розрахунку коефіцієнтів регуляторів

№	Найменування параметра	Умовне позначення та числове значення параметра
1	2	3
1	Постійна часу ротора	$T_r = 0,28 \text{ с}$
2	Приведена постійна часу ротора	$T' = 0,019 \text{ с}$
3	Активний опір статора	$R_s = 1,363 \text{ Ом}$
4	Приведений активний опір ротора	$R_r = 1,659 \text{ Ом}$
5	Номінальний струм фази статора	$I_n = 4,47 \text{ А}$
6	Номінальна фазна напруга	$U_\phi = 220 \text{ В}$
7	Напруга завдання на перетворювач	$U_3 = 5 \text{ В}$
8	Коефіцієнт передачі перетворювача	$k_n = U_\phi / U_3 = 220/5 = 44$
9	Коефіцієнт передачі датчика струму	$k_{ДС} = U_3 / I_n = 5 / 4,47 = 1,118 \text{ В/А}$

10	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі струму при частоті 4кГц	$T_{\mu i} = \tau = 1 / 4000 = 0,00025 \text{ с}$
11	Індуктивність головного магнітного контуру	$L_m = 0,441 \text{ Гн}$
12	Номінальне потокозчеплення	$\Psi_{rd} = I_H L_m = 4,47 \cdot 0,441 = 1,97 \text{ Вб}$
13	Коефіцієнт передачі датчика потокозчеплення	$k_{дп} = U_3 / \Psi_{rd} = 5 / 1,97 = 2,54 \text{ В / Вб}$
14	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі потокозчеплення	$T_{\mu \psi} = 2T_{\mu i} = 2 \cdot 0,00025 = 0,0005 \text{ с}$
15	Коефіцієнт передачі датчика моменту	$k_{дм} = U_3 / M_H = 5 / 40,52 = 0,123 \text{ В / Вб}$
16	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі моменту	$T_{\mu M} = 2T_{\mu i} = 2 \cdot 0,00025 = 0,0005 \text{ с}$
17	Коефіцієнт передачі датчика швидкості	$k_{дш} = U_3 / \omega_H = 5 / 74 = 0,068 \text{ Вс}$
18	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі швидкості	$T_{\mu \omega} = 2T_{\mu M} = 2 \cdot 0,0005 = 0,001 \text{ с}$

Постійна часу регулятора швидкості:

$$T_{рш} = 4T_{\mu \omega}; \quad (3.19)$$

$$T_{рш} = 4 \cdot 0,001 = 0,004 \text{ с.}$$

Передавальна функція регулятора швидкості:

$$W_{рш}(p) = \beta_{рш} \frac{T_{дш} p + 1}{T_{рш} p}; \quad (3.20)$$

$$W_{рш}(p) = 22,61 \cdot \frac{0,004p + 1}{0,004p};$$

### 3.2 Моделювання базової електромеханічної системи з векторним керуванням

Використовуючи модель асинхронного двигуна в двофазній системі координат (d - q) з урахуванням жорсткості ексцентрикового валу, а також



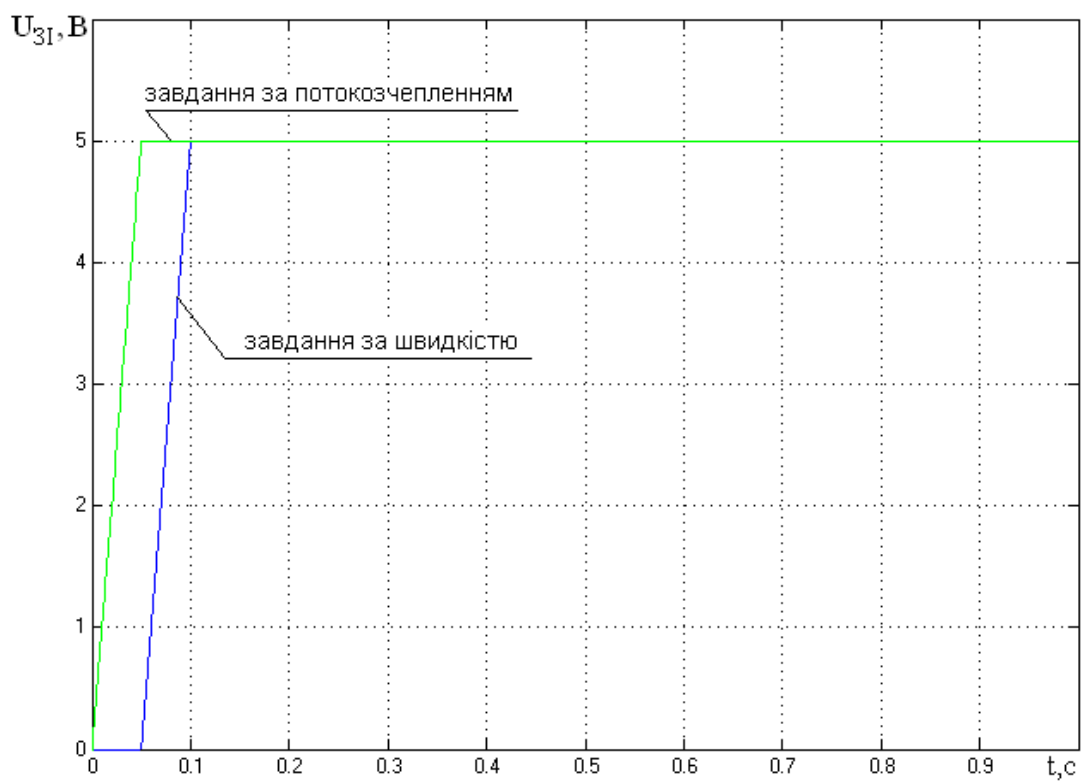


Рисунок 3.6 – Зміна напруги на виході підсистеми задатчика інтенсивності

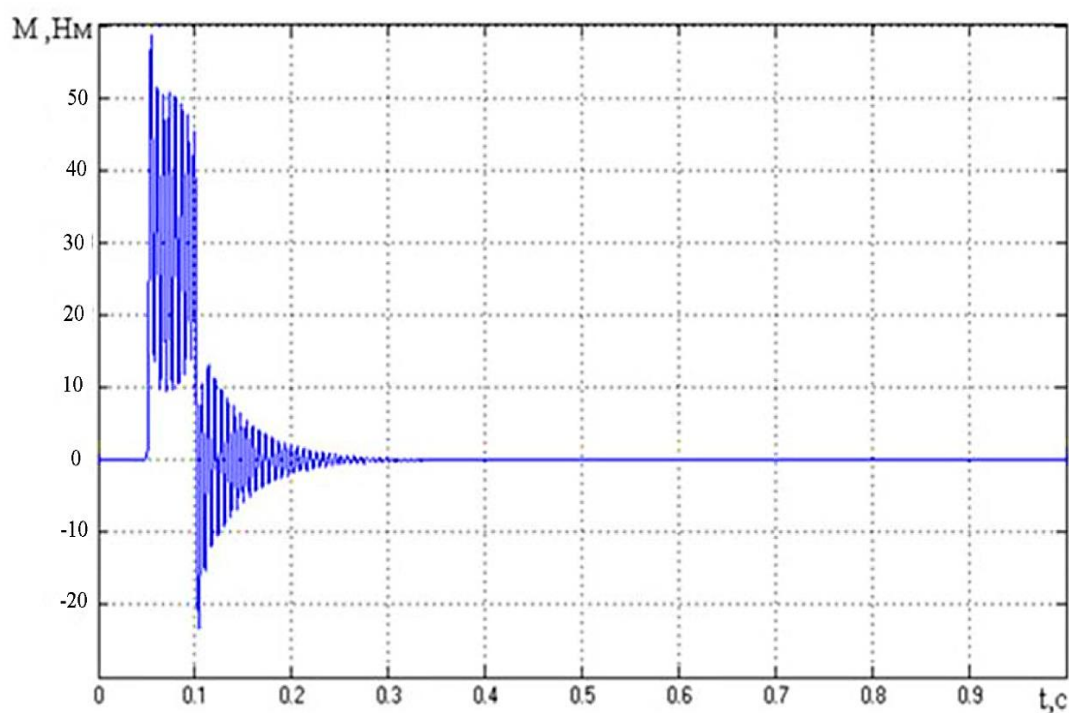


Рисунок 3.7 – Зміна моменту в електромеханічній системі з векторним керуванням при пуску

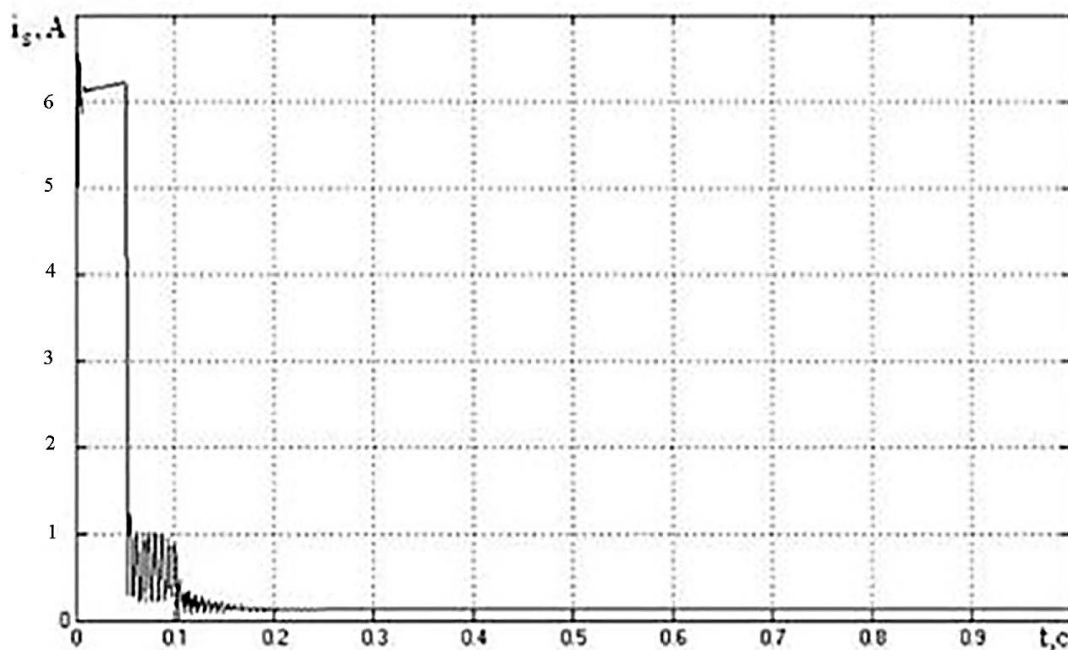


Рисунок 3.8 – Зміна значення струму статора в електромеханічній системі з векторним керуванням при пуску

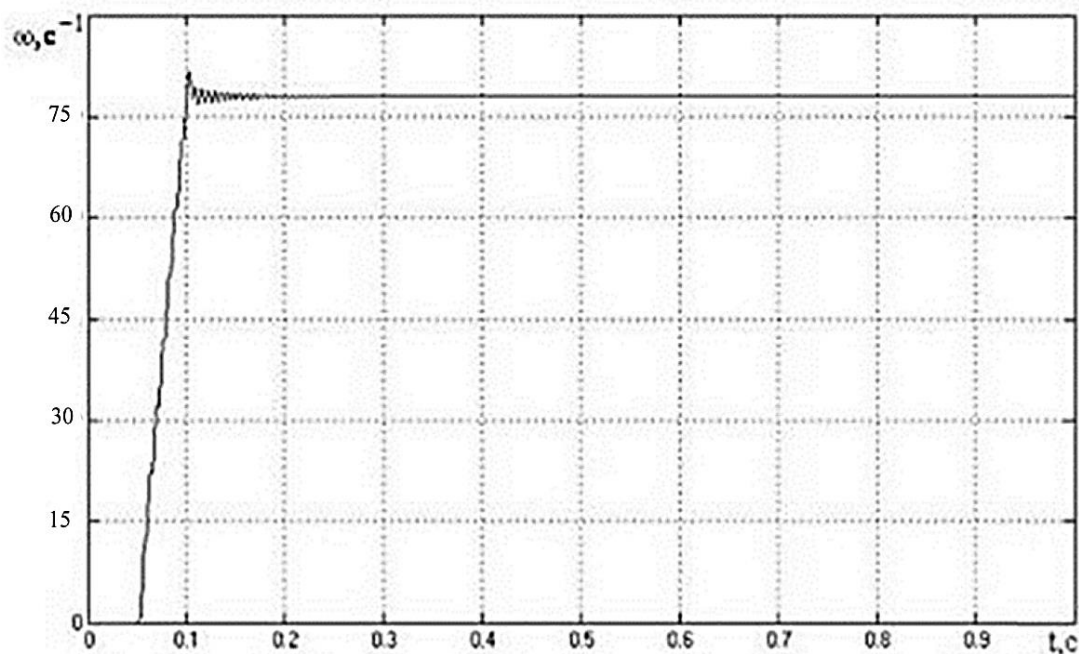


Рисунок 3.9 – Перехідна функція за швидкістю в електромеханічній системі з векторним керуванням при пуску

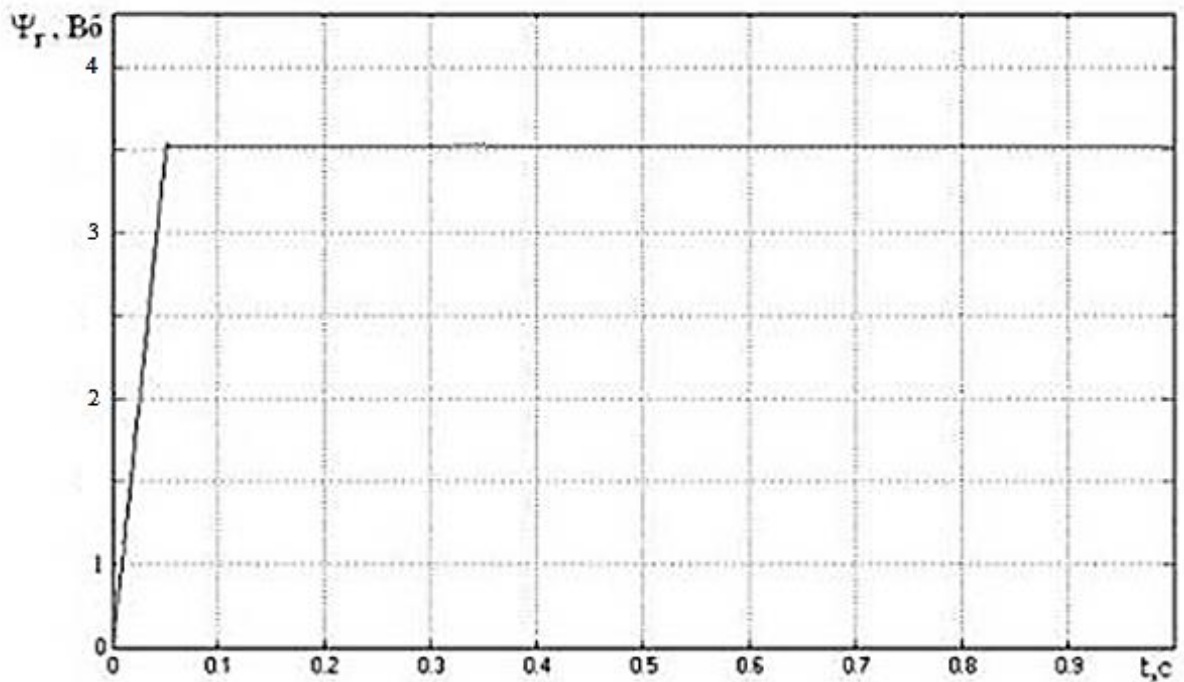


Рисунок 3.10 – Перехідна функція за потокозчепленням ротора в електромеханічній системі з векторним керуванням при пуску

Аналізуючи отримані динамічні характеристики можна зробити висновок, що швидкодія системи з векторним керуванням при пуску виявилася значно вища за швидкодію асинхронного двигуна, що включається в трифазну мережу. Так, тривалість перехідного процесу за швидкістю в електромеханічній системі з векторним керуванням складає близько 0,14 с, тоді як в електромеханічній системі без векторного керування вона дорівнювала 1,8 с, тобто швидкодія збільшується в 12 раз. Це свідчить про компенсацію великих постійних часу електроприводу за допомогою регуляторів. При цьому перерегулювання за швидкістю складає 4,6%, що є допустимим для даного технологічного процесу.

Із графіку зміни моменту, приведеному на рисунку 3.7, можна зробити висновок, що максимальне значення пускового моменту не перевищує допустимого значення  $1,9M_n = 1,9 \cdot 40,52 = 76,99\text{Нм}$ .

### 3.3 Дослідження електропривода бобінорізальної машини на стійкість

На базі отриманих за виразами (3.3) та (3.15) передавальних функцій для ПІ-регулятора струму, який ми використовуємо, а також результатів розрахунків коефіцієнтів регуляторів (табл. 3.1) за допомогою програми Mathcad було побудоване характеристичне рівняння. Після проведеної заміни оператора Лапласа  $p = j\omega$  виділяємо дійсну  $P(\omega)$  та уявну  $Q(\omega)$  частини рівняння :

Виділяємо дійсну  $P(\omega)$  та уявну  $Q(\omega)$  частини рівняння :

$$P(\omega) = \frac{6,52j\omega}{-45,3\omega^2 \cdot -0,768} \quad (3.21)$$

$$Q(\omega) = \frac{73,2j\omega}{-15,3\omega^2 \cdot -1,68} \quad (3.22)$$

Знаходимо вираз для АЧХ (амплітудно-частотної характеристики):

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} \quad (3.23)$$

$$A(\omega) = \sqrt{\left(\frac{6,52j\omega}{-45,3\omega^2 \cdot -0,768}\right)^2 + \left(\frac{73,2j\omega}{-15,3\omega^2 \cdot -1,68}\right)^2}.$$

Далі визначаємо логарифмічні амплітудно-частотну ЛАЧХ та фазо-частотну ФЧХ характеристики:

$$L(\omega) = 20 \cdot \log A(\omega), \quad (3.24)$$

$$L(\omega) = 20 \cdot \log \sqrt{\left(\frac{6,52j\omega}{-45,3\omega^2 \cdot -0,768}\right)^2 + \left(\frac{73,2j\omega}{-15,3\omega^2 \cdot -1,68}\right)^2}.$$

Для ФЧХ:

$$\phi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}, \quad (3.25)$$

$$\phi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{0,0015}{-0,013\omega},$$

По розрахованим даним будуюмо графіки ЛАЧХ та ФЧХ (рис. 3.11).

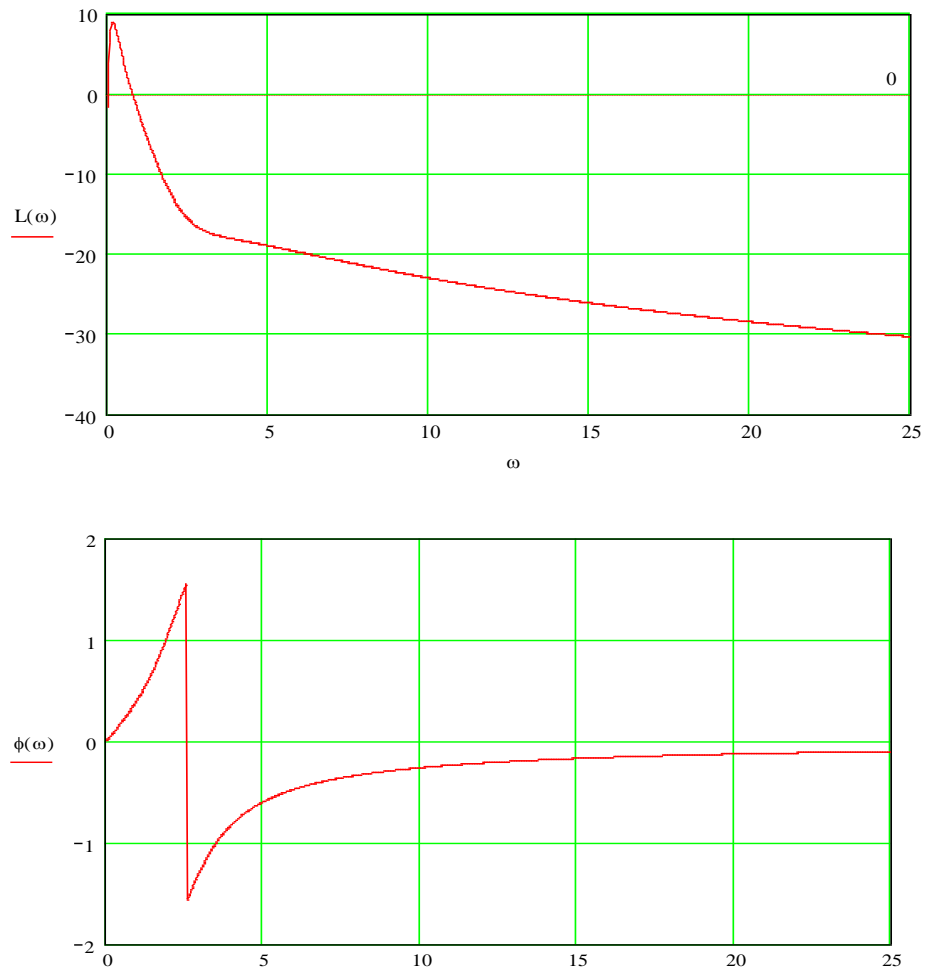


Рисунок 3.11 – Частотні характеристики для ПІ-регулятора струму

Із побудованих характеристик робимо висновок, що система є стійкою, оскільки маємо достатні запаси по фазі та амплітуді, а також  $\omega_{кр} > \omega_{зр}$ .

### 3.4 Визначення якісних характеристик електропривода

Для дослідження якості системи електропривода використовуємо передавальну функцію для ПІ-регулятора швидкості (3.20):

$$W_{PI} (p) = 22,61 \cdot \frac{0,004p + 1}{0,004P};$$

Знайдемо перехідну характеристику ПІ-регулятора швидкості за виразом:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W_{з.шв} (p)}{p} \right\}, \quad (3.26)$$

де  $p$  – оператор Лапласа.

Після розрахунку перехідної характеристики за допомогою програми Mathcad було побудовано такий графік (рис. 3.12).

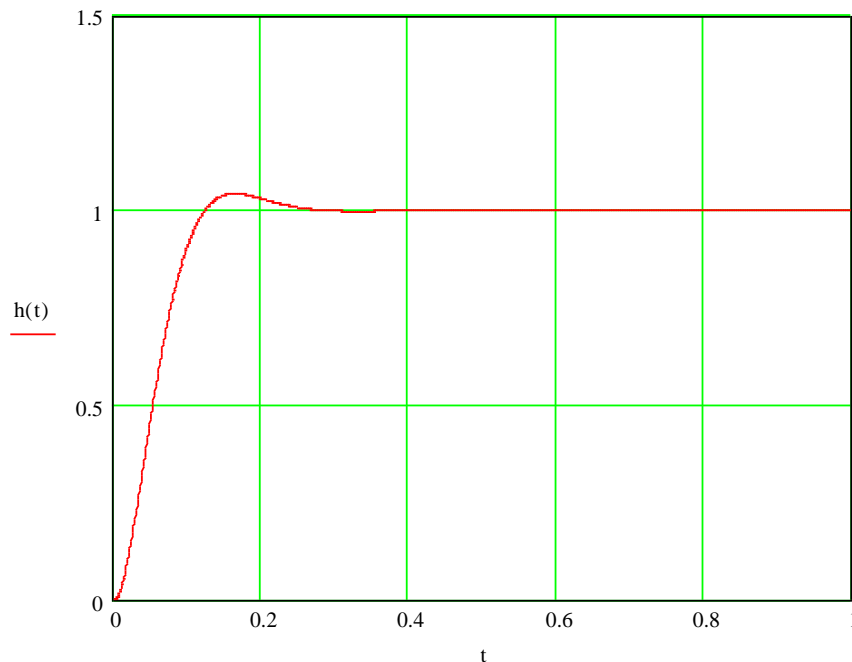


Рисунок 3.12 – Перехідна характеристика замкнутої системи

Головними характеристиками при перевірці якості є величина перегулювання та час регулювання:

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\%, \quad (3.27)$$

де:  $h_{\max}$  – амплітудне значення перехідної характеристики;

$h_{\text{уст}}$  – усталене значення перехідної характеристики.

У відповідності з отриманим графіком перегулювання перехідного процесу матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{1,1 - 1,0}{1,0} \cdot 100\% = 10\%.$$

Час перехідного процесу складає 0,25 с.

**Висновок до розділу.** На базі проведеного моделювання і розрахунків параметрів регуляторів можна зробити висновок, що за своїми характеристиками розроблений електропривод з векторною системою керування відповідає поставленим вимогам завдання.

## 4 ВИБІР АПАРАТУРИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ

### 4.1 Обґрунтування та вибір параметрів процесу, що підлягають контролю та регулюванню

Розвиток систем автоматизації хімічної промисловості обумовлюється пред'явленням підвищених вимог до отримуваних виробів, зростаючою інтенсифікацією технологічного процесу, ускладненням технологічних схем, а також використанням агрегатів великої потужності.

Вдосконаленню виробництва та поліпшенню умов праці сприяє і автоматизація допоміжних служб та технологічних процесів, а також вона дозволяє знижувати матеріальні витрати та покращувати техніко-економічні показники.

Контроль та регулювання параметрів технологічного процесу виробництва пакувального матеріалу в частині роботи з різання полімерного матеріалу на досліджуваній в даній роботі бобінорізальній машині ТОВ «І-ПАК» здійснюється цією машиною 1, також в склад обладнання входить насосна станція 2, фільтр масляний 3 та теплообмінник 4 (рис. 4.1).

Параметрами контролю бобінорізальної машини є:

- тиск масла, яке надходить в гідроциліндр для регулювання зусилля натягу полімерного матеріалу, повинно бути в межах 5–6 МПа;
- керування частотою обертання приводу вузла намотування, її необхідно регулювати залежно від типу матеріалу, що розрізається;
- керування частотою обертання вентилятора. У міру засмічення фільтра зростає аеродинамічний опір  $i$ , як наслідок, необхідно збільшувати витратно-напірні характеристики вентилятора;
- керування частотою обертання приводу вузла розмотування здійснюється для синхронізації роботи з вузлом намотування матеріалу;
- керування частотою обертання приводу вузла транспортування і різання матеріалу.

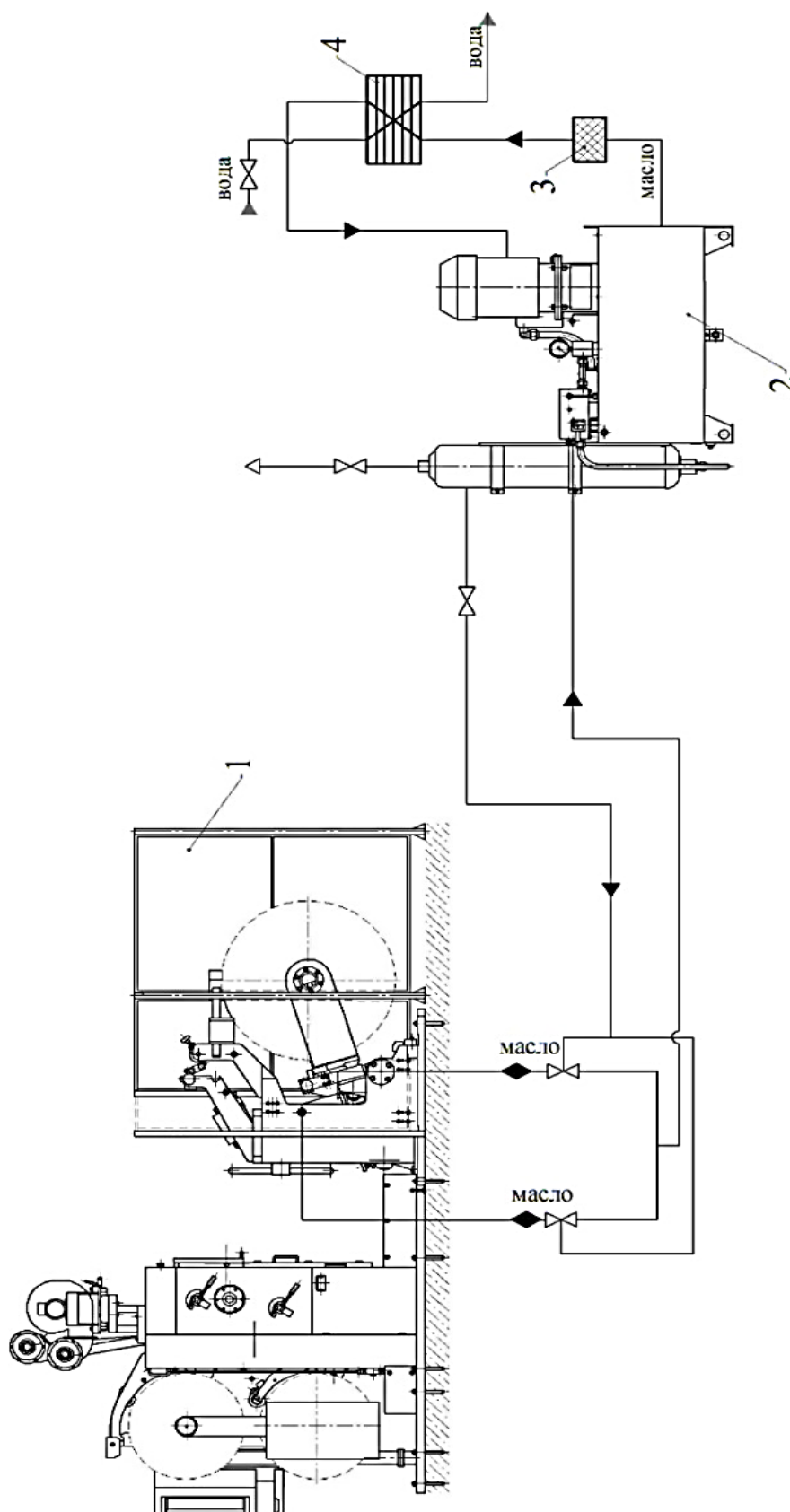


Рисунок 4.1 – Схема необхідного обладнання для функціонування бобінорізальної машини

1 – бобінорізальна машина; 2 – станція насосна; 3, – фільтр масляний;  
4 – теплообмінник

Контрольовані параметри насосної станції:

– рівень масла в баку. Необхідно постійно контролювати для недопущення поломки обладнання. Рівень масла повинен бути в межах 300–350 мм;

– температура масла. Потрібне контролювання і регулювання температури шляхом охолодження. Вона не повинна перевищувати 95° С;

– тиск масла повинен бути в межах 10–12 МПа. Забезпечує візуалізацію технічно- справного стану устаткування та регулює тиск.

Масляний фільтр.

Необхідно контролювання рівень засмічення фільтра шляхом вимірювання перепаду тиску, який повинен складати 0,2–0,3 МПа.

У таблиці 4.1 зведені параметри контролю та регулювання процесу різання полімерного матеріалу.

Таблиця 4.1 – Параметри, що підлягають контролю та регулюванню

Обладнання	Найменування параметру	Од. виміру	Номінал. значення	Доп. відх.	Конт- роль	Регулю- вання
Насосна станція	Рівень масла в баку	мм	325	±25	+	-
	Температура масла	°С	90	±5	+	+
	Тиск масла	МПа	11	±1	+	+
Фільтр масляний	Перепад тиску на масляному фільтрі	МПа	0,25	±0,05	+	-
Бобіноріза- льна машина	Тиск масла, що надходить в гідроциліндр	МПа	5,5	±0,5	+	+

## **4.2. Вибір приладів автоматичного контролю та регулювання**

### **4.2.1. Вибір системи приладів**

Технологічний процес різання полімерної плівки на ТОВ «І-ПАК» згідно ТКП 474-2013 відноситься до категорії приміщень В. Це означає, що можна використовувати стандартну електричну систему приладів контролю та регулювання. В якості керуючого пристрою обраний програмований логічний контролер (ПЛК) Simatic S7-300.

Для зв'язку датчиків з аналоговими модулями контролера обрано аналоговий сигнал 4-20 мА. Керуючі впливи з дискретних модулів виходу через пускачі будуть надходити на електричні виконавчі механізми. Сигнали 4-20 мА з модулів аналогового виведення ПЛК будуть надходити на аналогові входи приводу для керування його роботою [17].

Автоматизована система керування технологічним процесом (АСКТП) буде реалізована на базі ПЛК Simatic S7-300 і автоматизованих робочих місцях (АРМ) оператора, зі встановленою на них SCADA-системою WinCC. Зі своїх АРМ оператори мають можливість контролювати параметри технологічного процесу, відстежувати тривожні сигнали та, за необхідності, вручну керувати процесом.

### **4.2.2. Вибір первинних перетворювачів та приладів**

Вибір первинних перетворювачів залежить від характеру процесу, який необхідно контролювати, допустимих меж контрольованого параметра та інших експлуатаційних характеристик. При цьому необхідно враховувати, що використання радіоактивних, високочастотних та ультразвукових приладів вимагає аналізу можливості впливу випромінювання на обслуговуючий персонал та властивості одержуваної продукції. При виборі діапазону вимірювання та матеріалу, з якого виконаний перетворювач, повинні враховуватися умови його нормальної роботи [17].

Вибір лінії зв'язку в основному залежить від виду енергії, відстані, на яку необхідно передавати сигнал, а також від навколишнього середовища.

Керуючись вище викладеним, виберемо первинні перетворювачі для наведених в таблиці 4.1 параметрів процесу.

В якості первинних вимірювальних приладів для вимірювання рівня масла в баку вибираємо рівнемір типу Rosemount 5600 з вихідним сигналом 4–20 мА, для вимірювання температури вибираємо автоматичний термометр ТХАУ 205 з діапазоном вимірюваних температур від 0 до 100<sup>0</sup> С, для безперервного вимірювання тиску – прилад САПФІР-22МПІ з максимальним вимірюваним тиском до 15 МПа. Для вимірювання перепаду тиску – прилад APR-2000 з вихідним сигналом 4–20 мА.

Прилади автоматичного контролю та регулювання процесу представлені в таблиці 4.2.

#### 4.2.3. Вибір автоматичних регулюючих пристроїв

Для керування частотою обертання електродвигунів використовуємо частотний привод типу Omron CIMR F7Z4030, пуск та зупинка двигуна здійснюється пускачем Omron J7KNA. Для пуску виконавчих пристрій використовуємо пускач тиристорний типу ПБР-2М.

#### 4.2.4 Вибір виконавчих пристроїв

Виконавчі пристрої вибирають для забезпечення таких вимог:

- відповідність принципу роботи та конструкції пристрою виконуваному завданню, регульованій та навколишній умові;
- забезпечення необхідної швидкості регулювання та лінійності характеристики;
- забезпечення необхідної надійності та ресурсу роботи.

Прилади автоматичного контролю та регулювання процесу, що обрано, представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Прилади для контролю та регулювання технологічного процесу різання полімерного матеріалу

Поз	Найменування параметру керування	Найменування приладу	Тип приладу	Межа виміру	Технічні характеристики	Кількість
1	Керування частотою приводу обертання вузла намотування	Частотний привід Omron Varispeed F7	CIMR F7Z4030	-	4 кВт; 4 – 20 мА;	1
2	Керування частотою обертання вентилятора	Частотний привід Omron Varispeed F7	CIMR F7Z4030	–	4 кВт; 4 – 20 мА;	1
3	Двигун насоса насосної станції	Магнітний пускач	Omron J7KNA	–	Релейн. вход, 20 А.	1
4	Рівень масла в баку	Рівнемір	Rosemount 5600	0-600 мм	4–20 мА Похиб. 5 мм.	1
5-1	Температура масла	Термопара	ТХАУ 205	0-100°C	4–20 мА Похиб. 1%	1
5-2		Пускач тиристорний	ПБР-2М	–	Релейн. вход; 0–24 В	1
5-3		Виконавчий механізм	МЕО 250	–	250 Н·м 63 с	1
6-1	Тиск масла	Манометр	САПФІР-22МП	0-15 МПа	$I_{вх} = 4–20$ мА $P_{вих} = 0–0,2$ МПа	1
6-2		Пускач тиристорний	ПБР-2М	–	Релейн. вход; 0–24 В	1
6-3		Виконавчий механізм	МЕО 250	–	250 Н·м 63 с	1
7	Перепад тиску масляного фільтра	Дифманометр	APR-2000	0-1 МПа	Клас. точності 1 $I_{вх} = 4–20$ мА $P_{вих} = 0–2,5$ МПа	1

8-1	Тиск масла, що надходить в гідроциліндр	Манометр	САПФІР-22МП	0-15 МПа	$I_{вх} = 4-20$ мА $P_{вих} = 0-0,2$ МПа	1
8-2		Пускач тиристорний	ПБР-2М	–	Релейн. вхід; 0–24 В	1
8-3		Виконавчий механізм	МЕО 250	–	250 Н·м 63 с	1
9	Керування частотою обертання приводу вузла розмотування	Частотний привід Omron Varispeed F7	CIMR F7Z4030	–	4 кВт; 4 – 20 мА;	1
10	Керування частотою обертання приводу вузла транспортування і різання матеріалу	Частотний привід Omron Varispeed F7	CIMR F7Z4030	–	4 кВт; 4 – 20 мА;	1

#### 4.2.5 Робота засобів автоматизації об'єкта

Розглянемо роботу системи автоматизації відповідно до даних, приведених в табл. 4.2 та рис.4.1. В автоматичній системі регулювання та контролю (АСР та АСК) швидкості обертання приводу вузла намотування полімерної плівки бобінорізальної машини (поз. 1, табл. 4.2) керуючий вплив контролера надходить з дискретних виходів частотного приводу Omron Varispeed F7 CIMR F7Z4030, який змінює частоту обертання приводу вузла намотування. В АСК швидкості обертання приводу вентилятора до пирососа бобінорізальної машини (поз. 2) керуючий вплив контролера надходить з дискретних виходів частотного приводу Omron Varispeed F7 CIMR F7Z4030, який змінює частоту обертання приводу вентилятора.

Пуск та зупинка двигуна насосної стації відбувається за допомогою пускача Omron J7KNA (поз. 3), який отримує керуючий вплив з модуля дискретних виходів контролера.

В автоматичній системі контролю рівня масла в баку насосної стації рівень вимірюється рівнеміром Rosemount 5600 (поз. 4) з вихідним струмовим уніфікованим сигналом (4-20 мА) і передається на модуль аналогових входів ПЛК Simatic S7-300. В системі контролю температури масла в баку насосної температура вимірюється термопарою ТХАУ 205 (поз. 5-1) з вихідним струмовим уніфікованим сигналом (4-20 мА) і також передається на модуль аналогових входів ПЛК Simatic S7-300. Цей сигнал обробляється за відповідним закладеним у програмі законом регулювання і з модуля дискретних виходів контролера подається через пускач тиристорний ПБР-2М (поз. 5-2) на виконавчий механізм МЕВ 250 (поз. 5-3). Сигнал зворотного зв'язку при двох крайніх положеннях виконавчого механізму подається на модуль дискретних входів контролера.

В автоматичній системі регулювання і контролю тиску масла тиск вимірюється манометром САПФІР-22МП (поз. 6-1) і струмовим уніфікованим сигналом (4-20 мА) передається на модуль аналогових входів ПЛК Simatic S7-300. Цей сигнал обробляється за відповідним закладеним у програмі законом регулювання і з модуля дискретних виходів контролера подається через пускач ПБР-2М (поз. 6-2) на виконавчий механізм МЕВ 250 (поз. 6-3). Сигнал зворотного зв'язку, при двох крайніх положеннях виконавчого механізму подається на модуль дискретних входів контролера.

Контроль перепаду тиску на масляному фільтрі здійснюється дифманометром APR-2000 (поз. 7) і струмовим уніфікованим сигналом (4-20 мА) передається на модуль аналогових входів ПЛК Simatic S7-300.

В автоматичній системі регулювання та контролю тиску масла, що надходить в гідроциліндр бобінорізальної машини тиск вимірюється манометром САПФІР-22МП (поз. 8-1) та струмовим уніфікованим сигналом (4-20 мА) передається на модуль аналогових входів ПЛК Simatic S7-300. Цей сигнал обробляється за законом регулювання і з модуля дискретних виходів контролера подається через пускач ПБР-2М (поз. 8-2) на виконавчий механізм МЕВ 250 (поз. 8-3). Сигнал зворотного зв'язку при двох крайніх

положеннях виконавчого механізму подається на модуль дискретних входів контролера.

В автоматичній системі регулювання швидкості обертання приводу вузла розмотування полімерної плівки бобінорізальної машини керуючий вплив контролера надходить з дискретних виходів частотного приводу Omron Varispeed F7 CIMR F7Z4030 (поз. 9), який у відповідності з програмою змінює частоту обертання. В автоматичній системі регулювання швидкості обертання приводу вузла різання та транспортування полімерної плівки керуючий вплив контролера надходить з дискретних виходів частотного приводу Omron Varispeed F7 CIMR F7Z4030 (поз. 10), який у відповідності з програмою змінює частоту обертання даного приводу.

### 4.3 Розрахунок похибок вимірювальних контурів

Визначимо абсолютну похибку вимірювання температури масла в баку насосної станції за допомогою приладу ТХАУ 205 з границями основної допустимої похибки  $\delta = 1\%$ , та додатковою похибкою  $\pm 0,01\%$ .

Основна похибка визначається наступним чином:

$$\Delta_{\text{осн}} = \frac{\delta \cdot t}{100}, \quad (4.1)$$

$$\Delta_{\text{осн}} = \frac{1 \cdot 100}{100} = 1,0^{\circ}\text{C}.$$

Допустиму похибку від впливу температури навколишнього середовища визначимо за такою формулою:

$$\Delta_{\text{доп}} = (t_{\text{серед}} - 20) \cdot \delta_{\text{доп}}, \quad (4.2)$$

$$\Delta_{\text{доп}} = (100 - 20) \cdot 0,0001 = 0,008^{\circ}\text{C}.$$

Тоді загальна результуюча похибка буде дорівнювати:

$$\Delta = 1,1 \cdot \sqrt{\Delta_{\text{осн}}^2 + \Delta_{\text{доп}}^2} \quad (4.3)$$

$$\Delta = 1,1 \cdot \sqrt{1^2 + 0,008^2} = 1,1^{\circ}\text{C}.$$

Визначимо абсолютну похибку контролю тиску, що вимірюється манометром САПФІР-22МП з діапазоном вимірювання 15 МПа та границями основної допустимої похибки  $\delta = 1\%$  :

$$\Delta = \frac{\delta \cdot P}{100} \quad (4.4)$$

$$\Delta = \frac{1 \cdot 15}{100} = 0,15 \text{ МПа.}$$

Визначимо абсолютну похибку контролю перепаду тиску, що вимірюється дифманометром APR-200 з діапазоном вимірювання 1,0 МПа і границями основної допустимої похибки  $\delta = 1\%$ :

$$\Delta = \frac{\delta \cdot P}{100} \quad (4.5)$$

$$\Delta = \frac{1 \cdot 1}{100} = 0,01 \text{ МПа.}$$

Таким чином, з результатів розрахунків випливає, що величини похибок не перевищують допустимих для даного технологічного процесу величин.

### **Висновки за розділом.**

В розділі проведений вибір приладів для автоматичного контролю та регулювання процесу виробництва пакувального матеріалу з полімерної плівки. Проведений розрахунок похибок вимірювальних контурів, які виявилися незначними.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено опис технології виготовлення пакувальної полімерної плівки та загальний аналіз обладнання для її виробництва та різання.

У першому розділі здійснено дослідження предмета проєктування, де описані основні недоліки в його роботі в даний час, намічено шляхи вдосконалення електропривода бобінорізальної машини.

У другому розділі проведений розрахунок основних елементів модернізованого електропривода, визначені параметри схеми заміщення асинхронного двигуна; розраховані його динамічні параметри; проаналізована робота двигуна в динамічних режимах.

У третьому розділі розроблена функціональна схема електроприводу з векторною системою керування, проведено математичне моделювання цього електроприводу, а також дослідження приводу на якість та стійкість. Дослідження довело працездатність модернізованого електроприводу.

У четвертому розділі наведено вибір приладів для автоматичного контролю та регулювання процесу виробництва пакувального матеріалу з полімерної плівки. Проведений розрахунок похибок вимірювальних контурів, які виявилися незначними.

Таким чином можна зробити висновок, що модернізований електропривод бобінорізальної машини для полімерної плівки ТОВ «І-ПАК» відповідає всім поставленим вимогам. Після більш детальної доробки модернізована машина може бути використана у виробництві пакувальної полімерної плівки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів / О. В. Суберляк, П. І. Баштаник. – Львів, 2007. – 376 с.
2. Пахаренко В.А., Яковлева Р.А., Пахаренко А.В. Переробка полімерних композиційних матеріалів. - Київ: Воля, 2006. -552с.
3. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 книгах. Книга 2. Керування хіміко-технологічними процесами : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с.
4. Курта С.А., Лучкевич Є.Р., Матківський М.П. Хімія органічних сполук. Підручник для вищих навчальних закладів. – Івано-Франківськ: видавництво Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника, 2013. – 599 с.
5. R. Scaffaro, M. Morreale, G. Lo Re, F.P. La Mantia, Degradation of MaterBi®/wood flour biocomposites in active sewage sludge, Polymer Degradation and Stability, Volume 94, Issue 8, 2009, Pages 1220-1229.
6. Хелтон Ф. Дж., Келсі Р. Дж., Форсино Х.Є. Пакування і тара: проектування, технології, використання / Дж. Ф. Хелтон, Р. Дж. Келсі, Х. Є. Форсино; пер. с англ. - Львів : Новий Світ , 2004.– 632 с.
7. Шеремет О. І., Аксьонов В. П. Автоматизована електромеханічна система для регулювання розхилу валків натискного пристрою стану гарячого вальцювання 2500. / Донецьк: Вісник Донбаської державної машинобудівної академії № 1 (18), 2010. – С.339-343.
8. Деталі машин: підручник: затверджено МОН України/ А. В. Міняйло [та ін.]. – К.: Агроосвіта, 2013. – 448 с.
9. Проців В.В. Проектування редукторів з використанням САПР КОМПАС [Текст]: навч. посібник / В.В. Проців, К.А. Зіборов, О.М. Твердохліб. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 178 с. іл.
10. Farhan A.S., Auman A.Aly.El. Fundamentals of Automatic Control: Theory and Application. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 616 p.

11. Bavafa-Toosi Y. Introduction to Linear Control Systems – Academic Press, 2017. – 929 p. – ISBN 978-0-12-812748-3.
12. Донець О. В. Теорія електропривода/ В. І. Колотіло, О. В. Донець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
13. Каталог електродвигунів серії АІР. – Режим доступу: [https://air.com.ua/katalog\\_elektrovdigatelei\\_air/](https://air.com.ua/katalog_elektrovdigatelei_air/)
14. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. – К.: НАУ, 2019. – 492 с.
15. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
16. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
17. Ванько В.М. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) / Ванько В.М., Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Яцук Ю.В. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 580 с.
18. Raghavendra N.V., Krishnamurthy L. Engineering metrology and measurements / N.V. Raghavendra, L. Krishnamurthy. – Oxford University Press, 2013. – 546 p.
19. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» (141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 26 с.
20. Бондар І.В., Гладкий С.С. Удосконалення системи керування електроприводом бобінорізальної машини // Збірник тез за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики». (Полтава, 07 листопада 2025 р.) – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 297-299.

## ДОДАТКИ

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

**Розроблення та дослідження автоматизованої системи  
забезпечення раціонального температурно-вологісного  
режиму в плодовоочесховищі**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

студент групи 601МЕ

Слинько М.О.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В.

Полтава 2026

**Актуальність теми.** Сьогодні активно зростає попит на полімерні та композиційні матеріали з високими експлуатаційними властивостями. Всі підприємства, електростанції, котельні, навчальні заклади, побутова техніка, яка оточує нас щодня, сучасні обчислювальні машини, автомобілі тощо використовують полімерні та композиційні матеріали. Переробку полімерів та композиційних матеріалів можна розглядати як інженерну діяльність, пов'язану з перетворенням вихідних матеріалів в необхідні вироби потрібної якості. Таким чином, тема магістерської роботи для інтенсифікації та підвищення енергоефективності процесу обробки полімерних матеріалів є досить актуальною.

**Предмет дослідження** – електропривод бобінової машини.

**Об'єкт дослідження** – процес зміни навантаження при роботі електропривода бобінової машини з врахуванням вимог до технологічного процесу різання, а також зменшення витрат енергетичних і технічних ресурсів.

**Метою магістерської роботи** є удосконалення та дослідження електроприводу машини для різання полімерної плівки для підвищення ефективності його роботи.

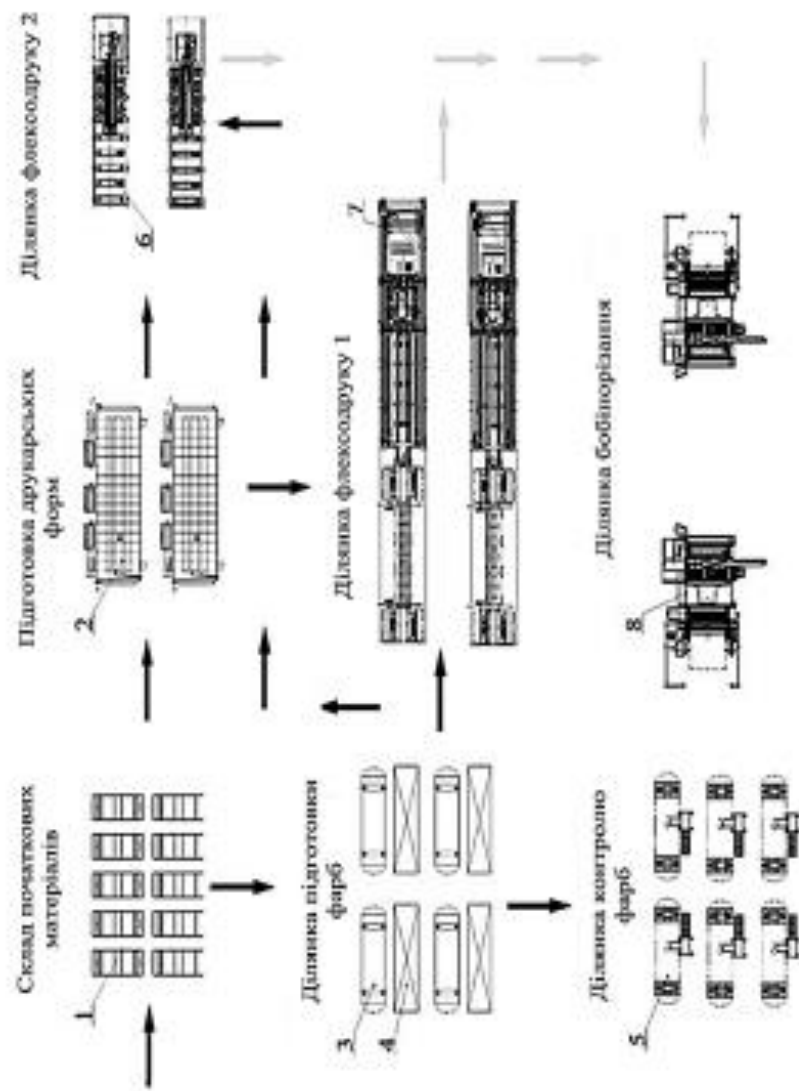
**Методика проведення досліджень.** У роботі використана комплексна методика дослідження, що поєднує методи математичного моделювання та інструментальні засоби.

Для реалізації даної мети потрібно виконати такі завдання:

- провести опис технології та обладнання для виготовлення полімерної плівки, подати загальну характеристику як самого виробництва, так і виробленої продукції;
- виявити основні недоліки в роботі, розглянути конструктивні особливості обладнання для різання полімерної плівки;
- зробити розрахунок навантажень, провести модернізацію електропривода бобінорізальної машини;
- провести моделювання модернізованого електропривода та виконати дослідження його динамічних характеристик;
- вибрати прилади автоматичного контролю та регулювання.

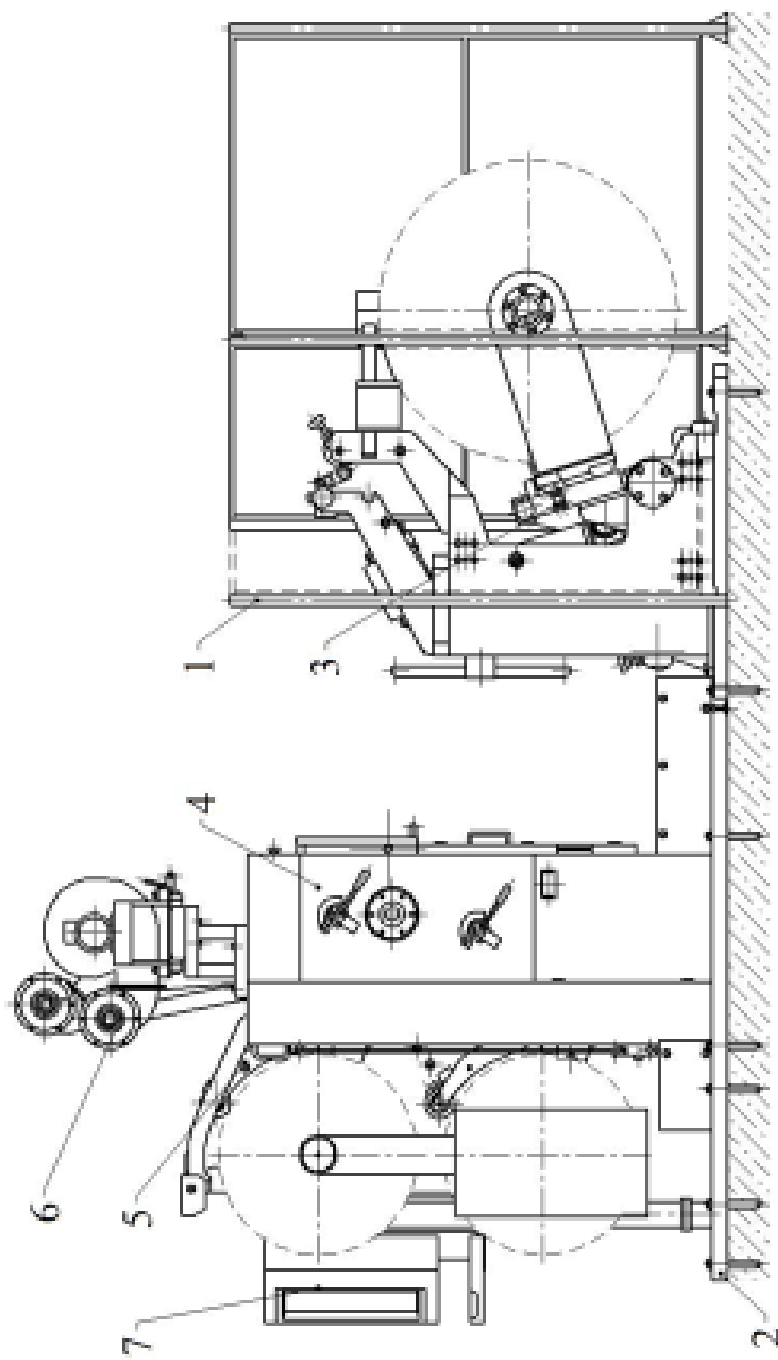


## Технологічна схема виробництва пакувальних матеріалів 4



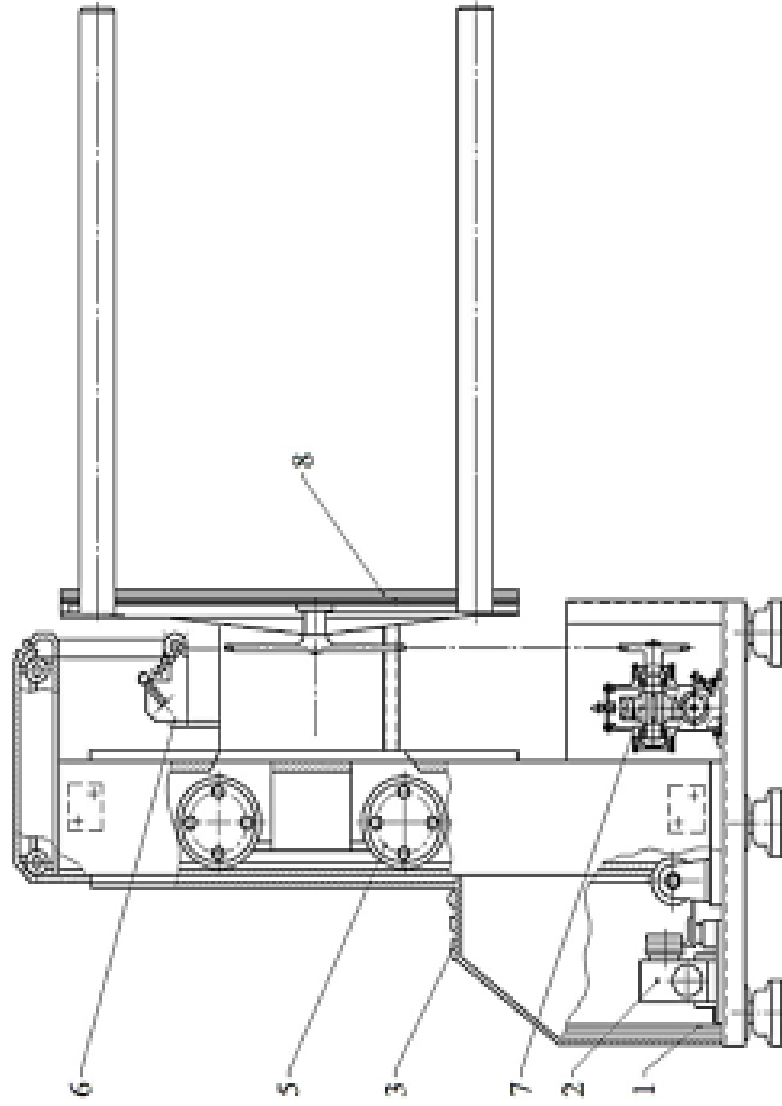
- 1 – кліматична камера; 2 – верстат підготовки друкованих форм; 3 – камера змішувача; 4 – утилізатор; 5 – витяжний бокс; 6 – флексодрукарська машина FEVA; 7 – флексодрукарська машина MarkAndy P4; 8 – бобіно-різальна машина Venus III

## Основні структурні елементи бобінорізальної машини 5



- 1 – рама; 2 – станція; 3 – вузол розмотування; 4 – вузол різання і транспортування;  
5 – вузол намотування; 6 – місцева вентиляція;  
7 – пульти керування

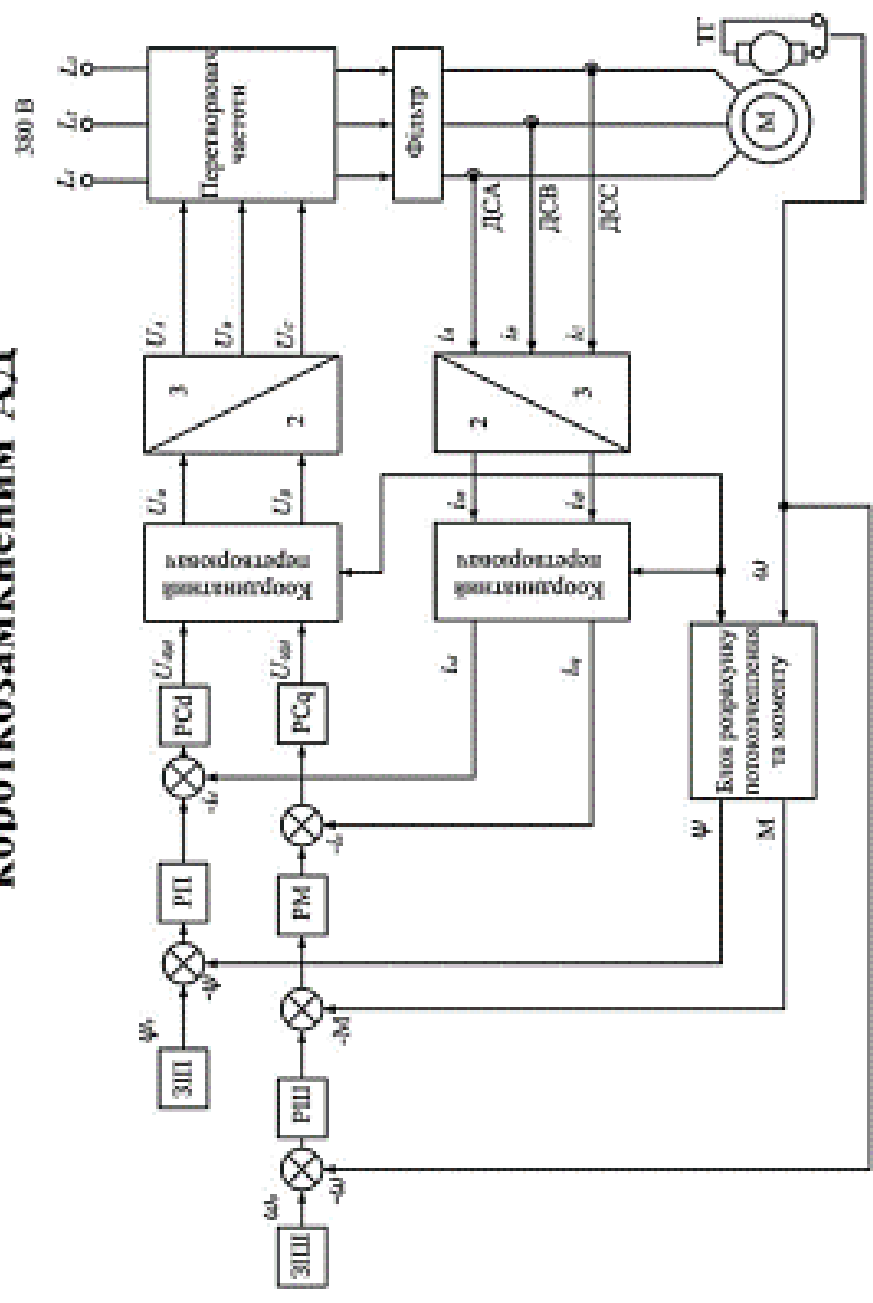
## Конструкція знімача бобін **б**



- 1 – рама; 2 – привід ланцюгової передачі; 3 – корпус; 4 – колона;  
5 – роликки напрямні; 6 – запобіжний механізм; 7 – привід механізму знімання;  
8 – механізм знімання бобін

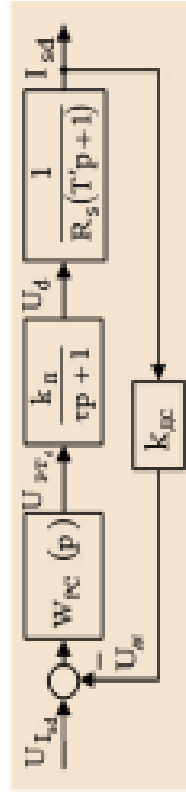
# 7 Функціональна схема системи векторного керування

## КОРОТКОЗАМКНЕНИМ АД



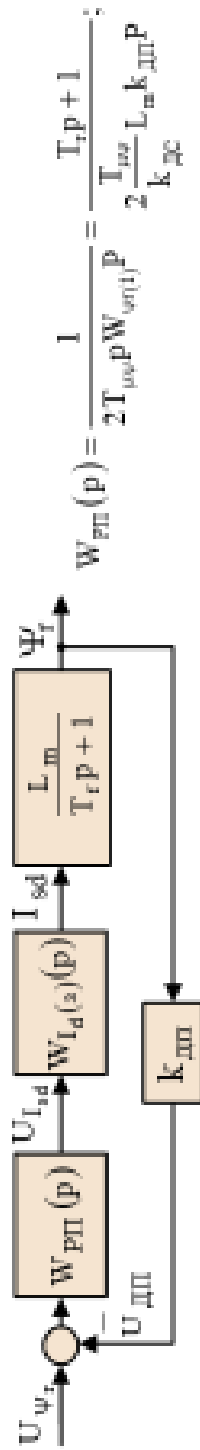
М – асинхронний двигун; ДС, ТГ – датчик струму і швидкості; РПШ, РП, РСd, РСq – регулятори швидкості, потокозчеплення та струму для d- і q- складових струму статора відповідно; ЗП – задатчик інтенсивності потокозчеплення та швидкості двигуна

## 8 Синтез регуляторів системи керування електроприводом бобінорізальної машини



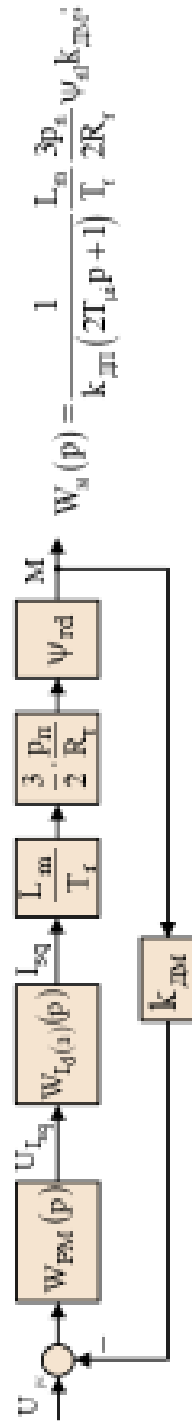
$$W_{sd}(p) = W_{вк}(p) \frac{k_n}{Tp + 1} k_{ac} \frac{1}{R_s(T_i p + 1)}$$

Структурна схема контуру регулювання струму за віссю d



$$W_{PI}(p) = \frac{1}{2T_{ин} p W_{(s)}(p)} = \frac{T_i p + 1}{\frac{T_{ин}}{2} L_m k_{DM} p}$$

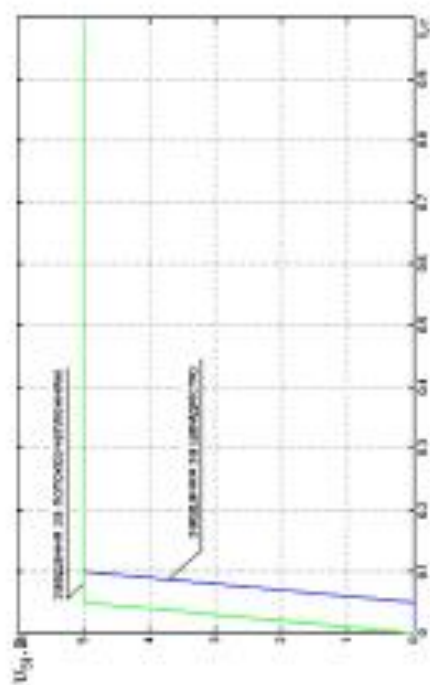
Структурна схема контуру потокозчеплення



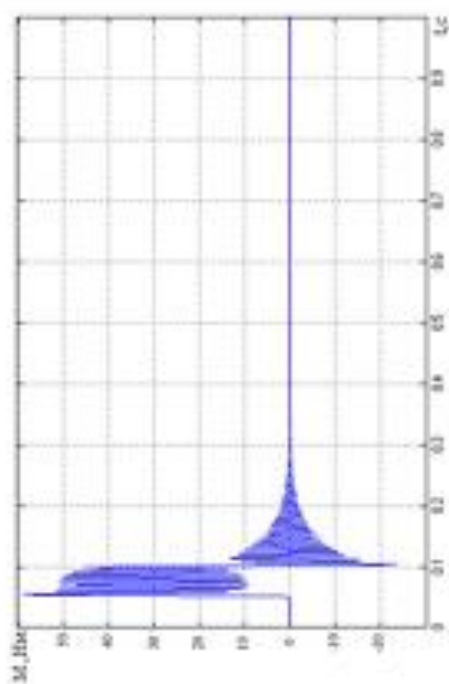
Структурна схема контуру регулювання моменту



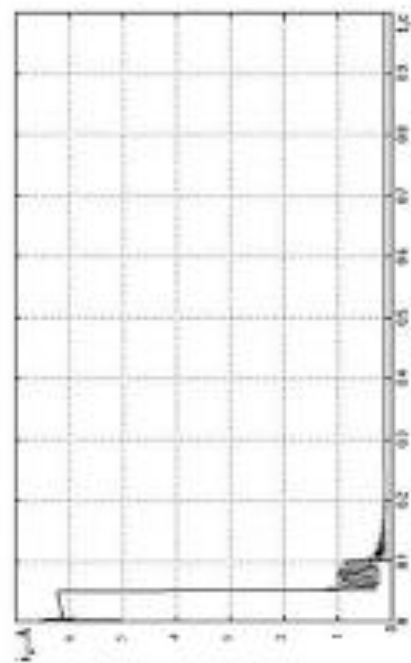
## Дослідження модернізованої електромеханічної системи з векторним керуванням 10



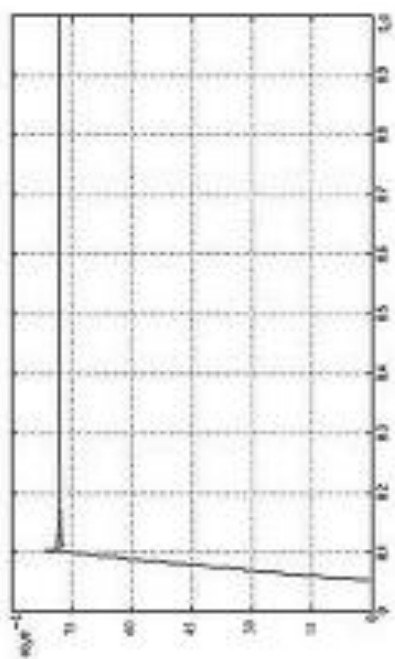
Зміна напруги на виході підсистеми задатчиків інтенсивності



Зміна моменту двигуна під час пуску



Зміна струму статора двигуна під час пуску



Зміна швидкості обертання двигуна під час пуску

# Визначення якісних характеристик електропривода 11

Передавальна функція для ПІ-регулятора швидкості

$$W_{\text{PI}}(p) = \beta_{\text{PI}} \frac{T_{\text{дп}} p + 1}{T_{\text{PI}} p}$$

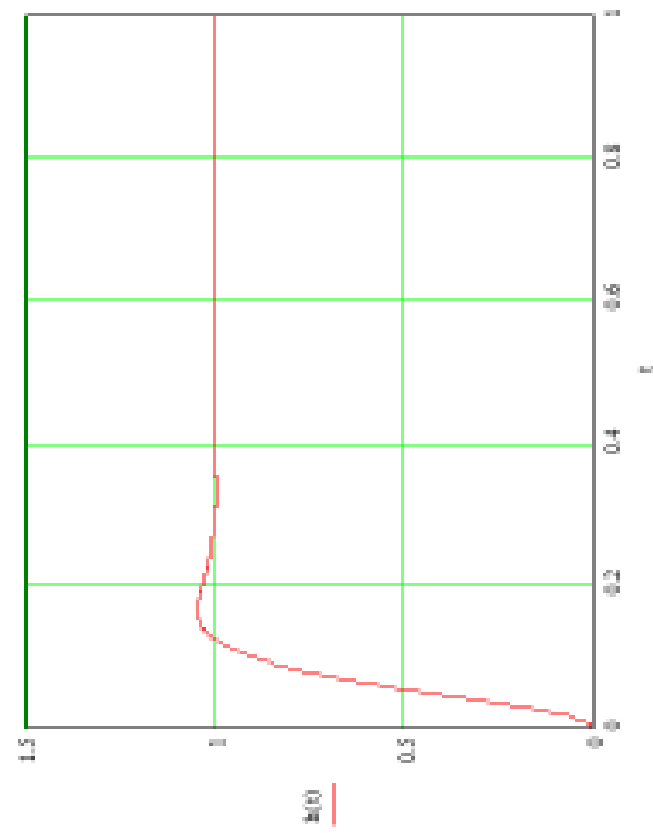
Головними характеристиками при перевірці якості є величина перерегулювання та час регулювання ( час перехідного процесу):

Перерегулювання

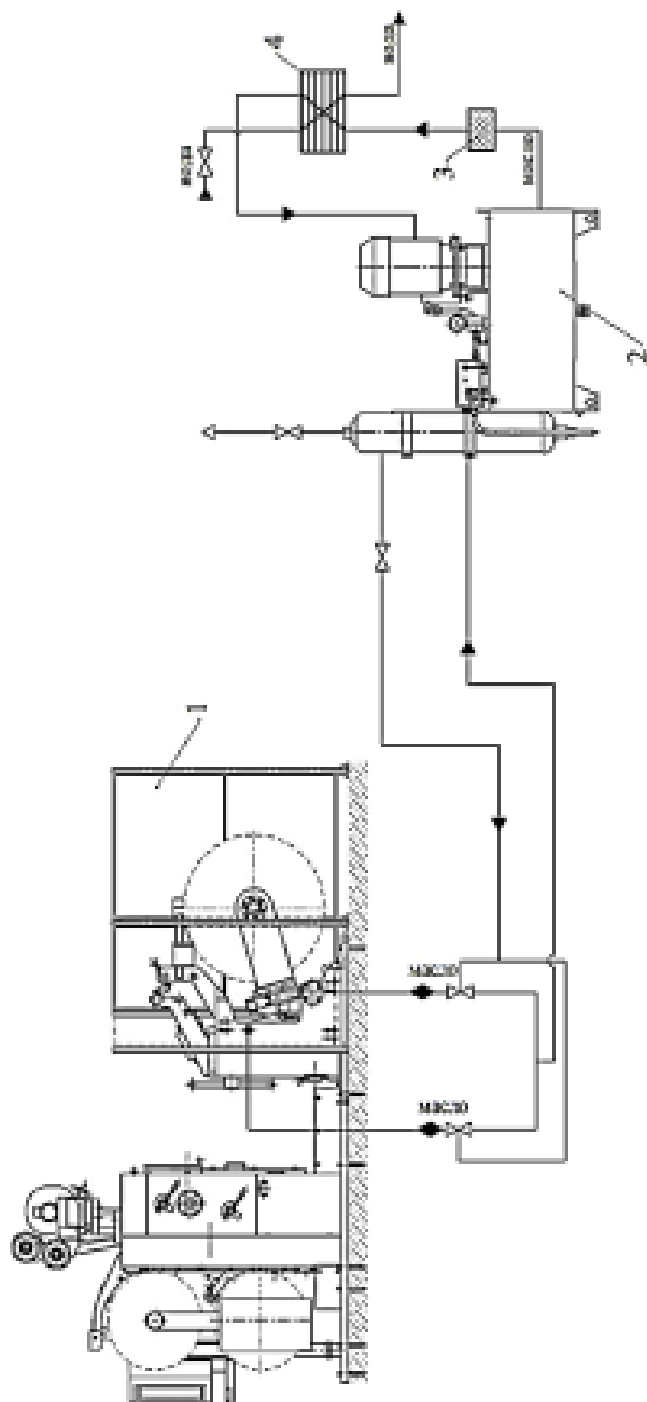
$$\sigma = \frac{1,1 - 1,0}{1,0} \cdot 100\% = 10\%$$

Час перехідного процесу складає 0,25 с

Перехідна характеристика для ПІ-регулятора швидкості



## Схема необхідного обладнання для функціонування машини 12



Обладнання	Найменування параметру, що підлягає контролю та регулюванню
Насосна станція 2	Рівень масла в баку
	Температура масла
	Тиск масла
Фільтр масляний 4	Перепад тиску на масляному фільтрі
Бабнір і зальця машина 1	Тиск масла, що надходить в гідроциліндр
Теплообмінник 4	Температура води

Поз	Найменування параметру контролю	Найменування приладу	Тип приладу	Межа виміру	Технічні характеристики	Кількість
1	Керування частотою приводу обертання вала розмолування	Частотний привід Valtersed F7	Олеон F724080	-	4 кВт; 4 – 20 мА;	1
2	Керування частотою обертання вентилятора	Частотний привід Valtersed F7	Олеон F724080	-	4 кВт; 4 – 20 мА;	1
3	Діагн. насосна станція	Малітний насос	Олеон J700A	-	Релейн. вход; 20 А.	1
4	Рівень масла в баку	Рівняч	Ассемблент 5600	0-600 мм	4-20 мА Повиб. 5 мм.	1
5-1	Температура масла	Термодат	ТХАУ 209	0-100°С	4-20 мА Повиб. 1%	1
5-2		Пускчипросторний	ПБР-2М	-	Релейн. вход; 0-24 В.	1
5-3		Висловний мивантам	МВО 250	-	250 Нм 63 с	1
6-1	Тиск масла	Манометр	САПО-32МП	0-15 МПа	$I_p = 4-20$ мА $P_{max} = 0-0,2$ МПа	1
6-2		Пускчипросторний	ПБР-2М	-	Релейн. вход; 0-24 В.	1
6-3		Висловний мивантам	МВО 250	-	250 Нм 63 с	1
7	Перевід тиску масла до фільтра	Дифференціал	АРВ-2000	0-1 МПа	Клас. точності I $I_p = 4-20$ мА $P_{max} = 0-2,5$ МПа	1
8-1	Тиск масла, що надходить в гідрощемір	Манометр	САПО-32МП	0-15 МПа	$I_p = 4-20$ мА $P_{max} = 0-0,2$ МПа	1
8-2		Пускчипросторний	ПБР-2М	-	Релейн. вход; 0-24 В.	1
8-3		Висловний мивантам	МВО 250	-	250 Нм 63 с	1
9	Керування частотою обертання приводу вала розмолування	Частотний привід Valtersed F7	Олеон F724080	-	4 кВт; 4 – 20 мА;	1
10	Керування частотою обертання приводу вала транспортування різниці матеріалу	Частотний привід Valtersed F7	Олеон F724080	-	4 кВт; 4 – 20 мА;	1

У магістерській роботі проведено опис технології виготовлення пакувальної полімерної плівки та загальний аналіз обладнання для її виробництва та різання.

- У першому розділі здійснено дослідження предмета проєктування, де описані основні недоліки в його роботі в даний час, намічено шляхи вдосконалення електропривода бобінірзальної машини.
- У другому розділі проведений розрахунок основних елементів модернізованого електропривода, визначені параметри схеми заміщення асинхронного двигуна; розраховані його динамічні параметри; проаналізована робота двигуна в динамічних режимах.
- У третьому розділі розроблена функціональна схема електроприводу з векторною системою керування, проведено математичне моделювання цього електроприводу, а також дослідження приводу на якість та стійкість. Дослідження довело працездатність модернізованого електроприводу.
- У четвертому розділі наведено вибір приладів для автоматичного контролю та регулювання процесу виробництва пакувального матеріалу з полімерної плівки. Проведений розрахунок похибок вимірювальних контурів, які виявилися незначними.

Таким чином можна зробити висновок, що модернізований електропривод бобінірзальної машини для полімерної плівки ТОВ «І-ПАК» відповідає всім поставленим вимогам. Після більш детальної доробки модернізована машина може бути використана у виробництві пакувальної полімерної плівки.

## Додаток Б

Міністерство освіти і науки України  
 Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
 "1 DECEMBERIE 1918" University of Alba Iulia (Румунія)  
 Білостоцький техніко-логічний університет (Польща)  
 Вільнюський університет прикладних наук (VIKO) (Литва)  
 Університет Флорида (США)  
 London Metropolitan University (Велика Британія)  
 Словачеський технологічний університет (Словаччина)  
 Гринч-металургійна академія імені Станіслава Сташиця (Польща)  
 Національний університет «Закарієвська політехніка»  
 Національний університет «Дніпровська політехніка»  
 Національний університет «Одеська політехніка»  
 Ізмаїльський державний гуманітарний університет  
 Глухівський національний університет  
 Сумський національний аграрний університет  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігори Сікорського»  
 Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди  
 Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
 Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного  
 Київський національний університет будівництва та архітектури  
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
 Одеський національний університет імені Л.Л. Мечникова

## МОЛОДІЖНА НАУКА: ІННОВАЦІЇ ТА ГЛОБАЛЬНІ ВИКЛИКИ

ЗБІРНИК ТЕЗ  
 II МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ  
 КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ  
 ВЧЕНИХ



Полтава, 07 листопада 2025 року

<i>Решетник Роман Владиславович</i> <i>Дрючко Олександр Григорович</i>	ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ Й ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОТИ ОПТИЧНОГО ТРАКТУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ DWDM .....	289
<i>Сухорєбрій Олександр Володимирович</i>	ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ .....	291
<i>Cinque Paola</i>	NON-REFERENCE QUALITY CONTROL FOR STUDYING TECHNOLOGICAL PROCESSES OF INTELLECTUAL PRODUCTION ..	294
<i>Тзар Демус Ігорович</i>	SAFE COMMUNICATION IN SOCIAL NETWORK: ANALYSIS AND LSB STABILITY OF STENOGRAPHY METHOD .....	296
<i>Бондар Ілля Віталійович</i> <i>Гладкий Станіслав Станіславович</i>	УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ БОБІНОРІЗАЛЬНОЇ МАШИНИ .....	297
<i>Голуб Артем Юрійович</i>	ОГЛЯД АГЕНТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ .....	299
<i>Дрюбан Володимир Вікторович</i>	УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ІР-ТЕЛЕФОНІЇ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ELASTIX .....	301
<i>Драган Максим Демисович</i> <i>Колб Андрій Антонович</i>	ІСК ЯК НОВІ ІДЕЇ ДЛЯ ВДЕ СЕКТОРУ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ.....	302
<i>Забільський Владислав Вадимович</i> <i>Гайтан Олена Миколаївна</i>	АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОШУКУ РОБОТИ ЗАСОБАМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....	304
<i>Котелевський Михайло Юрійович</i> <i>Олійник Іван Вікторович</i> <i>Данилко Вікторія Олексіївна</i> <i>Таран Артем Ярославович</i> <i>Гайтан Олена Миколаївна</i>	ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ .....	306

methods, sustainable error correction codes and cryptographic mechanisms. This approach makes it possible to ensure the stability, invisibility and reliability of information transmission, which are the key instruments for secure communication in the modern digital environment.

#### References

- 1.Llc, O. L. & C. (n.d.). Steganography - CTF handbook. <https://ctf101.org/forensics/what-is-steganography/>
2. Raiyan, S. R., & Kabir, M. H. (2025, March 16). SCReedSolo: A Secure and Robust LSB Image Steganography Framework with Randomized Symmetric Encryption and Reed-Solomon Coding. [arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2503.12368](https://arxiv.org/abs/2503.12368)
3. Pilania, U., Kumar, M., & Mittal, V. (2023). Performance evaluation of LSB steganography based on multiple image formats. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 26(7), 1911–1924. <https://doi.org/10.47974/jdm-sc-1725>

УДК 62.52

*Бондар Ілля Віталійович*

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

*Гладкий Станіслав Станіславович*

здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Національний університет

«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

### УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ БОБІНОРІЗАЛЬНОЇ МАШИНИ

В роботі розглядається електропривод машини для різання полімерної плівки з метою підвищення його енергетичної і технологічної ефективності. На базі проведеного розгляду технологічного процесу різання [1] були виявлені основні недоліки в роботі електроприводу машини, здійснена його модернізація.

Для удосконалення машини було вирішено використати електропривод з векторним керуванням, переваги якого полягають у високій точності регулювання швидкості та моменту обертання, значній енергоефективності, яка досягається завдяки оптимізації роботи двигуна, та гнучкості системи, котра легко адаптується до різних умов роботи. Також вона легко інтегрується з системами автоматизації, що існують [2].

В процесі модернізації проведено математичне моделювання асинхронного двигуна в двокоординатній системі координат з урахуванням жорсткості ексцентричного валу, виконаний математичний опис електроприводу з векторною системою керування. В середовищі MATLAB

Simulink [3] отримана модель системи з векторним керуванням (рис.1), що має зворотні зв'язки за струмом, моментом та швидкістю.

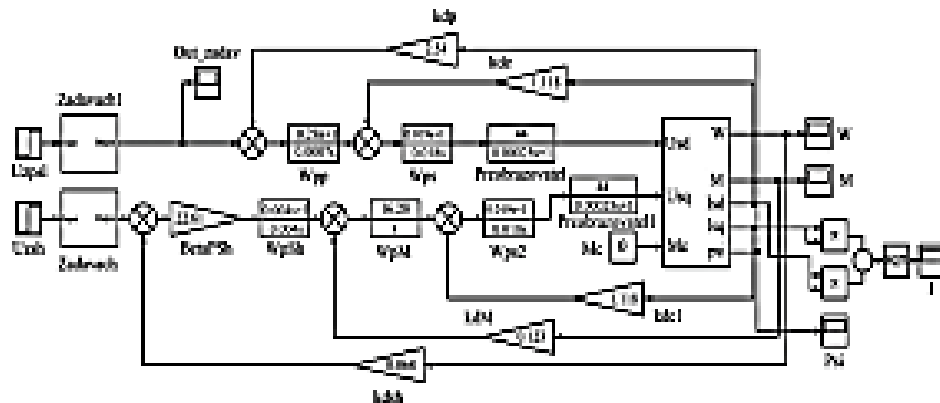


Рис. 1. Модель базової електромеханічної системи з векторним керуванням в середовищі MATLAB Simulink

Проведений розрахунок коефіцієнтів регуляторів струму, потокомчеплення ротора, моменту та швидкості. Досліджена зміна моменту в модернізованій системі під час пуску привода (рис.2).

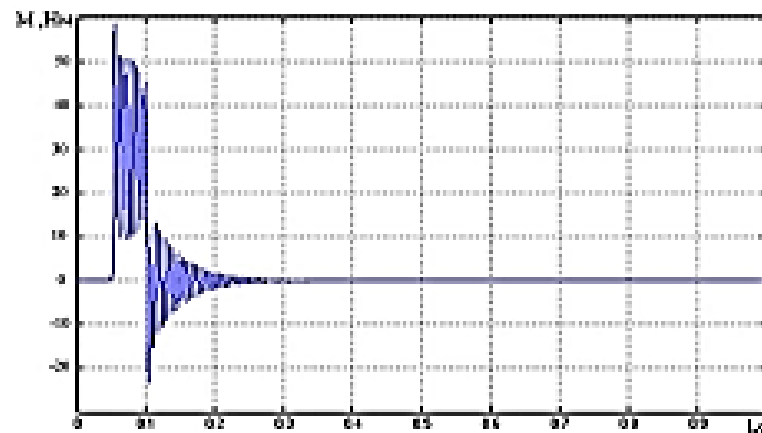


Рис. 2. Графік зміни моменту в електромеханічній системі з векторним керуванням під час пуску

Аналізуючи отримані при дослідженні моделі динамічні характеристики, можна зробити висновок, що швидкодія системи з векторним керуванням при пуску виявилася значно вищою швидкодій раніше дослідженого асинхронного двигуна, що включиться в трифазну мережу. Так, тривалість перехідного процесу за швидкістю в електромеханічній системі з векторним керуванням складає близько 0,14 с, тоді як в традиційній електромеханічній системі вона дорівнювала 1,8 с, тобто

швидкодія збільшується в 12 разів. Це свідчить про достатню компенсацію великих постійних часу електроприводу за допомогою вищевказаних регуляторів. При цьому перерегулювання за швидкістю складає 4,6%, що є допустимим для даного технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. Пахаренко В.А., Яковлева Р.А., Пахаренко А.В. Переробка полімерних композиційних матеріалів. - Київ: Воля, 2016. -552с.
2. Scaffaro, M. Morreale, G. Lo Re, F.P. La Mantia, Degradation of MaterBi®/wood flour biocomposites in active sewage sludge, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 94, Issue 8, 2009, Pages 1220-1229.
3. Лазарев Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab: електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.

УДК 004.8

*Галуб Артем Юрійович*

здобувач вищої освіти

*Науковий керівник: Канітон Алла Мирославівна*

доктор педагогічних наук, кандидат економічних наук, професор

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»

## **ОГЛЯД АГЕНТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ**

LLM-агенти (агенти на основі великих мовних моделей) являють собою інноваційний підхід до автоматизації завдань у сфері програмування, який базується на інтеграції мовних моделей з агентними системами для генерації програмного коду.

Однією з фундаментальних переваг LLM-агентів є їхня здатність до генерації програмного коду на основі описів природною мовою (NL2Code). Проте варто зазначити, що специфікації, надані користувачами природною мовою, часто характеризуються неоднозначністю або недостатньою деталізацією, що призводить до генерації коду низької якості. Крім того, великі мовні моделі демонструють обмежені можливості щодо розв'язання комплексних програмних завдань із множинними вимогами або підвищеним рівнем складності.

Для подолання зазначених обмежень у дослідженні [1] запропоновано платформу колаборативної генерації коду, яка інтегрує інтелектуальні агенти на основі LLM. Дана платформа оптимізує процес генерації коду шляхом декомпозиції завдання NL2Code на чотири послідовні етапи: визначення ролей, оптимізація вимог, написання коду та верифікація результатів.